



Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság
Asociația Societatea Maghiară Tehnico-Științifică din Transilvania
Ungarische Technisch-Wissenschaftliche Gesellschaft in Siebenbürgen
Hungarian Technical Scientific Society of Transylvania

ROMANIA, 400604 Cluj, B-dul 21 Decembrie 1989 nr. 116; ☒ RO-400750 Cluj, C.P. 1-140.
CUI: 5646615; Tel.: 0040-264-590825, 0744-783237; e-mail: emt@emt.ro; web: <http://www.emt.ro>

Kedves Békési Gergő Bendegúz!

Örömmel értesítjük, hogy az Ön közleményét *Periodikusan változó mágneses tér élettani hatásainak elemzésére alkalmas időtartománybeli véges differencia módszer használó keretrendszer kialakítása nyílt forráskódú platformon nyílt hozzáféréssű adathalmaz segítségével* / *Development of a Framework Using Finite-Difference Time-Domain Method for The Analysis of The Health Effects of a Periodic Magnetic Field on an Open-Source Platform Using an Open Access Dataset* címmel, (kisebbs módosításokkal) közlésre elfogadtuk a *Fiatal Műszakiak Különszáma* folyóiratunkban, mely a *Műszaki Szemle* folyóirat keretén belül jelenik meg.

A megjelenésre vonatkozó további információk a folyóirat online felületén olvashatóak, ahol naprakész információk találhatók a közlemény helyzetére vonatkozóan.

Köszönjük, hogy munkáját a mi folyóiratunkban publikálja.

Üdvözlettel,

Köllő Gábor,
a folyóirat főszerkesztője



Kolozsvár, 2022. július 28.

Periodikusan változó mágneses tér élettani hatásainak elemzésére alkalmas időtartománybeli véges differencia módszert használó keretrendszer kialakítása nyílt forráskódú platformon nyílt hozzáférésű adathalmaz segítségével

Development of a Framework Using Finite-Difference Time-Domain Method for The Analysis of The Health Effects of a Periodic Magnetic Field on an Open-Source Platform Using an Open Access Dataset

BÉKÉSI Gergő Bendegúz

bekesigergobendeguz@edu.bme.hu

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Budapest, Műegyetem rakpart. 3, 1111, + 36 30 353 5936, <https://hu.linkedin.com/in/gergobekesi>

Absztrakt: Az infokommunikációs eszközök térhódításával egyre nagyobb hangsúlyt kell helyezni azok élettani hatásainak vizsgálatára. Erre alkalmas az FDTD módszer, amellyel kapcsolatban az elmúlt évtizedet intenzív kutatás jellemezte. Számos publikáció született ezzel kapcsolatban, azonban eddig, különösen a hazai irodalomban kevésbé kerültek fókuszba a modellezéshez felhasználható nyílt forráskódú eszközök és az ezekkel építhető rendszerek előnyei. Ezt a hiányt hivatott pótolni ez a munka.

Abstract: With the proliferation of infocommunication tools, an increasing emphasis is being placed on their physiological effects. The FDTD method, for which the last decade has been intensively researched, is suitable for this. Numerous papers have been published in this field, but so far, especially in the Hungarian literature, there has been little focus on the advantages of open-source tools that can be used for modelling and the systems that can be built with them. This work is intended to fill this gap.

Kulcsszavak: FDTD szimuláció, nyílt forrású, esettanulmány, elektromágneses tér, élettani hatás

1. BEVEZETÉS

A mágneses tér jelenléte egy természetes dolog a környezetünkben. Az emberi szervezetre a Föld saját mágneses tere nincs negatív hatással, annak nem okoz problémát. Azonban a technológiai fejlődés, a gépesítés, a növekvő elektrifikáció és a különböző infokommunikációs eszközök nagyütemű terjedése miatt kialakuló mesterséges mágneses terek élettani hatás szempontjából való vizsgálata kiemelten fontos.

Erre a vizsgálatra legtöbbször különböző numerikus szimulációkat alkalmaznak, hiszen a komplex valós rendszerek sokszor nem írhatók le könnyen analitikusan. Három fő módszer családot érdemes megemlíteni ezen a téren: a véges elem- [1], az integrálegyenleten alapuló peremelem- vagy momentum- [2] és a véges differencia módszereket [3]. Ezek közül ez a munka az utolsóra, az FDTD (Finite-Difference Time-Domain) módszerre fókuszál.

A módszer alapjait Yee [4] fektette le. Ő alkalmazott először a Maxwell-egyenletek megoldására térben és időben véges rácson véges differenciáláson alapuló operátorokat. Az FDTD fogalmat azonban csak később, Taflové [5] használta, aki dielektromos testekben és üregekkel rendelkező fémtestekben végzett szimulációkat ± 1 dB pontossággal. Ezzel a módszerrel számos elektromágneses térhez kapcsolódó problémát lehet szimulálni, megoldani. Tan [6] nemcsak a különböző számítások, hanem a tudás továbbadásának szempontjából is alapos áttekintést készített a tématerületről és különböző megértést segítő mobilalkalmazásokra is kitért. Teixeira [7] pedig néhány olyan fontosabb fejlesztést foglalt össze, mint például a PML (perfectly matched layer) használata vagy az alkalmazott rács finomítása.

Számos kutatási területen használnak FDTD szimulációt. Tanaka és társai [8] metál-oxid varisztorok elektromágneses terét szimulálták. Hőmérsékletérzékeny cellákat alkalmaztak véges hálójukban és a számításuk eredményeként többek között a hőmérsékleteloszlásra tudtak következtetni. Cao és társai [9] az FDTD módszerrel vetnek össze egy konvolúciós neurális hálós megoldáson alapuló nagy teljesítményű

elektromágneses impulzusokat előre jelző modellt földi járművek esetében. Mohammadi és társai [10] villámok elektromágneses szimulációját vizsgálják a tárgyalta módszerrel GPU támogatású gyorsítás esetében, úgy, hogy nagy pontosság mellett húszszoros gyorsítás elérésére képesek. Choroszuchó és Stankiewicz [11] épületek vasbeton szerkezetének hatását vizsgálták az épületekben wifi-jel hatására kialakuló elektromágneses térre. A szimulációhoz használt környezetben dielektrikumok és vezetők segítségével modelleztek négy jellemző épülettípust. Tatematsu és társai [12] állomások és erőművek kisfeszültségű vezérlőáramkörökkel kapcsolatban alkalmaztak FDTD szimulációt. Ennek segítségével voltak képesek elemezni bizonyos túlfeszültség-védelmi működéseket. Yan és társai [13] elektromágneses interferencia problémákat vizsgáltak szigetelt kapujú bipoláris tranzistorok kikapcsolásánál FDTD-val. Impulzus szélesség modulációs motorvezérlés esetén 10 dB-nél kisebb hibát sikerült elérniük a módszerrel a tapasztalati adatokhoz képest.

Élettani hatások terén is számos alkalmazás kerül elő. Zhang és társai [14] a mágneses indukció hatására keletkező hő mennyiségét vizsgálják az emberi testben GPU alapú módszerrel. Park és társai [15] 0,25 – 1,05 THz tartományban szimulálták az emberi bőr viselkedését elektromágneses tér hatására egészséges bőr, bazális sejtes karcinómás bőr, illetve diszpláziás és normál nevus esetében. Baek és társai [16] FDTD módszerrel végeztek vizsgálatot milliméteres hullámhossztartományban emberi rács modellen. De található publikáció sztochasztikus szimulációról [17], mobiltelefon egészségügyi hatásairól [18] és terhes nőkre gyakorolt elektromágneses hatás elemzéséről [19] is a témában.

A cikk hátralévő része a következők szerint épül fel. Először áttekintésre kerül az FDTD módszer és annak alapja a 2. szakaszban. Ezt követően a 3. szakaszban bemutatásra kerülnek a fejlesztett keretrendszer részletei. A 4. szakaszban pedig a munka összegzése olvasható.

2. AZ FDTD MÓDSZER

Ebben a fejezetben az FDTD módszer számítási alapjai és a szimulációhoz szükséges struktúra fontos általános jellemzői kerülnek bemutatásra.

2.1 Az FDTD szimuláció alapját képező fizikai törvények

Az FDTD módszer alapja a Faraday-törvény és az Ampère-törvény használata. Ezek hagyományosan az alábbi alakúak veszteséges, paramágneses anyagok esetén:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \nabla \times H - \frac{\sigma \cdot E}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times E \quad (2)$$

ahol:

- E a villamos térerősség, mértékegysége $\left[\frac{V}{m}\right]$,
- t az idő, mértékegysége $[s]$,
- ϵ_0 a vákuum permittivitása, mértékegysége $\left[\frac{A \cdot s}{V \cdot m}\right]$,
- ϵ_r a relatív permittivitás, mértékegység nélküli arányszám $[-]$,
- H a mágneses térerősség, mértékegysége $\left[\frac{A}{m}\right]$,
- σ a fajlagos vezetőképesség, mértékegysége $\left[\frac{1}{\Omega \cdot m}\right]$,
- μ_0 pedig a vákuum permeabilitása, mértékegysége $\left[\frac{V \cdot s}{A \cdot m}\right]$.

Azonban FDTD szimulációnál a megfelelő PML választás szempontjából fontos, hogy hasonló nagyságrendűek legyenek az egyenletekben használt E és B értékek. Éppen ezért $E_{\text{szimuláció}}$, és $B_{\text{szimuláció}}$ a vákuum permittivitás gyökével és a vákuum permeabilitás gyökével való szorzásokkal kaphatók meg. Ennek megfelelően a Faraday-törvény és az Ampère-törvény az alábbi alakban írható fel:

$$\frac{\partial E_{\text{szimuláció}}}{\partial t} = \frac{1}{c \cdot \epsilon_r} \nabla \times H_{\text{szimuláció}} - \frac{\sigma \cdot E_{\text{szimuláció}}}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \quad (3)$$

$$\frac{\partial H_{\text{szimuláció}}}{\partial t} = -\frac{1}{c} \nabla \times E_{\text{szimuláció}} \quad (4)$$

ahol az eddig nem tárgyalt mennyiségek:

- $E_{\text{szimuláció}}$ a villamos térerősség a szimuláció mértékegységében $\left[\frac{V^{\frac{1}{2}} \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{m^{\frac{3}{2}}} \right]$, a továbbiakban E_s jelöléssel,
- $H_{\text{szimuláció}}$ a mágneses térerősség a szimuláció mértékegységében $\left[\frac{V^{\frac{1}{2}} \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{m^{\frac{3}{2}}} \right]$, a továbbiakban H_s jelöléssel,
- c pedig a fénysebesség, mértékegysége $\left[\frac{m}{s} \right]$.

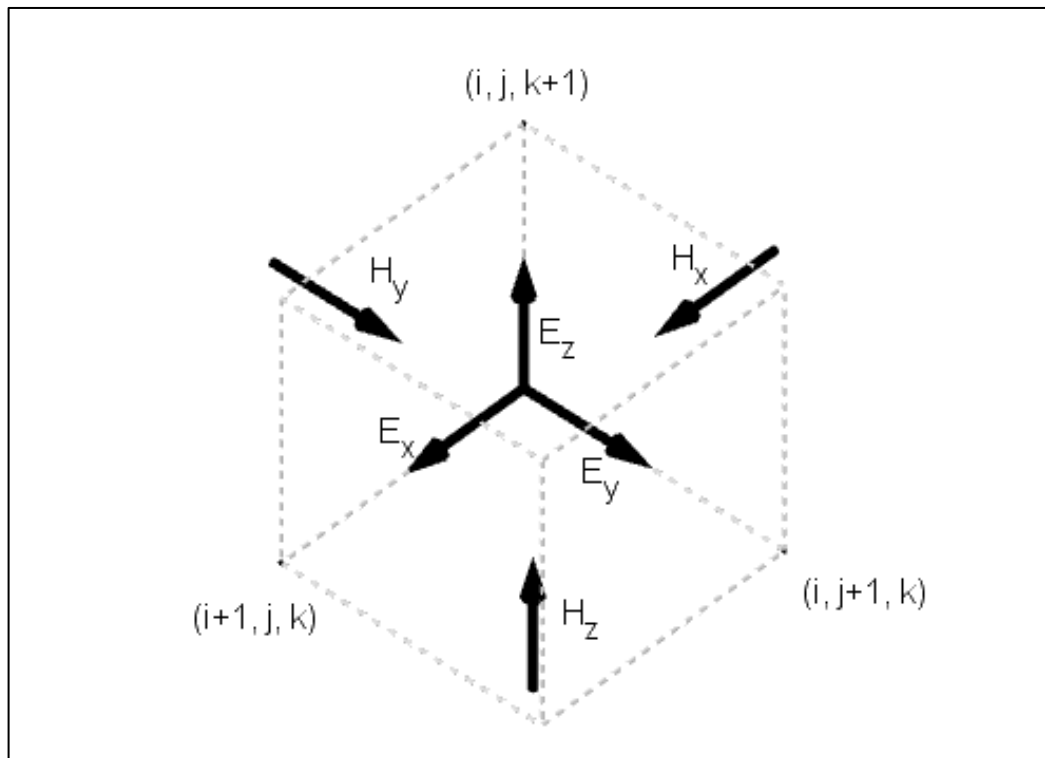
Ezek a módosított alakban felírt törvények önmagukban még nem alkalmasak elektromágneses jelenségek szimulációjára. Ehhez el kell végezni a megfelelő diszkretizálást.

2.2 Az FDTD szimuláció számítási módszerei

Ebben a fejezetben kerülnek bemutatásra a korábban leírt törvények diszkretizált alakjai. Ehhez azonban elengedhetetlen a megfelelő időbeli és térbeli diszkretizálás mikéntjének ismerete.

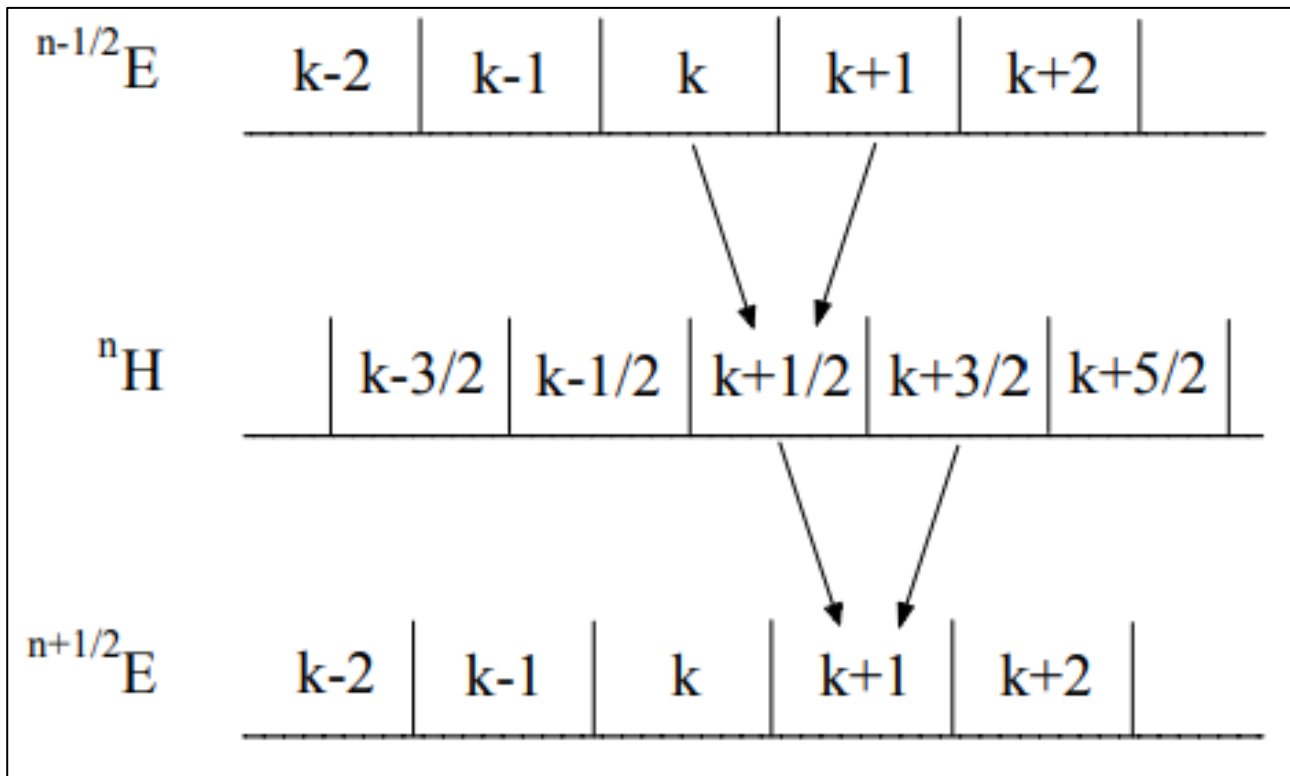
2.2.1 A szimulációhoz szükséges rács és tulajdonságai

Az FDTD szimuláció koncepciójának fontos része az úgynevezett Yee cella [4] alkalmazása. Ez az 1. ábrán figyelhető meg a villamos mező és a mágneses mező komponenseinek feltüntetésével.



1. ábra: Yee cella

Minden modellezendő objektum ilyen cellákból épül fel és az ezekből kialakuló rácsra írandó majd fel a Faraday- és az Ampère-törvény diszkrétizált alakban. Minden egyes rácskockához tartoznak bizonyos paraméterek. A (3) és (4) egyenleteknek megfelelően ezek a paraméterek a relatív permittivitás és a fajlagos vezetőképesség. Egy ilyen rácsrendszeren a számítások időben és térben is egymásbaágyazottak. Ezt jól bemutatja a 2. ábra.



2. ábra Villamos- és mágneses térerősség időbeli átlapolása

Tehát a villamos térerősség értékei mindig tört, a mágneses térerősség értékei pedig mindig egész pillanatokban értelmezettek a szimuláció során. Ettől függetlenül természetesen a villamos térerősség értékek is kiszámíthatók egész időpillanatokra átlagolással, azonban ez csak a didaktikai szempontból lesz lényeges a 2.2.2 szakaszban.

Érdemes még megjegyezni itt a PML használatot. A PML, vagy tökéletesen illesztett réteg, abból az okból szükséges, hogy el lehessen kerülni a modellezett tartomány széléről való visszaverődést. Ez tulajdonképpen nevezhető akár a modell egy „elnyelő peremfeltételének”, hiszen fizikailag a modell szélein, annak külső részén található. Ezekben a középponttól távolabbi cellákban úgy kerülnek megválasztásra az egyes anyagparaméterek, hogy a bejutó elektromágneses hullám fokozatosan elnyelésre kerüljön a lehető legkisebb szórással. Taflové és társai [20] részletes összefoglalót készítettek a PML használatáról. Jelen munkában az úgynevezett unaxiális anizotróp PML (UPML) kerül felhasználásra.

2.2.2 Diszkrétizált Faraday- és Ampère-törvény

Így már bemutatathatók a korábban leírt törvények diszkrétizált alakjai. Ehhez a következő jelölési konvenció társul. A ${}^n_z V_s^i$ mennyiség a szimuláció (s) valamelyik vektormennyiségének (V^i , a szimuláció során E^i vagy H^i), z tengely menti komponense az n . időpillanatban, a korábban említett átlapolások figyelembevételével. Az „ i ” használata opcionális. Elhagyása esetén az adott térerősség értékről beszélünk, míg az „ avg, d ”, „ rot, d ” vagy „ Δ, d ” esetén az alábbiak szerint kifejtett diszkrét mennyiségek átlagáról, rotációjáról vagy különbségéről.

$${}^n_z E_s^{\Delta, d} = \frac{1}{c \cdot \epsilon_r} {}^n_z H_s^{rot, d} - \frac{\sigma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} {}^n_z E_s^{avg, d} \quad (5)$$

$$n_z E_s^{\Delta,d} = \frac{n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) - n^{-\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta t} \quad (6)$$

$$n_{H_s}^{rot,d} = \frac{n_{H_s} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - n_{H_s} \left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - n_{H_s} \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) + n_{H_s} \left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \quad (7)$$

$$n_z E_s^{avg,d} = \frac{n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) + n^{-\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{2} \quad (8)$$

$$n_{H_s}^{\Delta,d} = \frac{1}{c} n_{H_s}^{rot,d} \quad (9)$$

$$n_{H_s}^{\Delta,d} = \frac{n^{+\frac{1}{2}} H_s \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - n_{H_s} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta t} \quad (10)$$

$$n_z E_s^{rot,d} = \frac{n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i + \frac{1}{2}, j + 1, k\right) - n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i + 1, j + \frac{1}{2}, k\right) + n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta z} \quad (11)$$

Ezekből pedig kifejezhetők a szimuláció következő villamos és mágneses térerősség értékei.

$$n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) = \frac{\left(1 - \frac{\sigma \cdot \Delta t}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}\right) \cdot n^{-\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{c \cdot \epsilon_r} n_{H_s}^{rot,d}}{1 + \frac{\sigma \cdot \Delta t}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} \quad (12)$$

$$n^{+\frac{1}{2}} H_s \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) = n_{H_s} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) + \frac{\Delta t}{c} n_z E_s^{rot,d} \quad (13)$$

Látható, hogy az (5 - 13) összefüggések az egyes térerősségek z tengely menti összetevőire vonatkoznak. Az x és y tengely menti mennyiségek számítása ezzel azonos módon történik. Ez a függelékben szerepel.

3. ADATFOLYAM ÉS KERETRENDSZER KIALAKÍTÁSA

Ezen módszerek ismeretében már végezhető FDTD szimuláció. Ez a munka elsősorban az ehhez szükséges keretrendszer kialakítására fókuszál. Ebben a szakaszban tárgyalásra kerül a szimuláció futtatásához szükséges rácsrendszer felépítésének folyamata és adatmenedzsmentje. Ehhez szimulációs szempontból a Laporte és munkatársai [21] által fejlesztett nyílt forráskódú *fddt* Python könyvtár kerül felhasználásra.

3.1 A felhasznált adatok

Számos 3D modell adatbázis létezik, amely emberi testmodelleket is tartalmaz. Ezeknek egy jelentős része nem ingyenes hozzáférésű, azonban ilyenre is van példa. Ebben a munkában a *Clara.io* [22] a *3D Warehouse* [23] és az *Artec 3D* [24] modelljei kerültek felhasználásra. A *Clara.io* egy webalkalmazás, amellyel többek között 3D objektumokat készíthetnek a felhasználók. Fejlesztője az Exocortex. Az alapszintű funkciók ingyenesen használhatók és a tervek szerint ez nem fog változni. A *3D Warehouse* egy jellegzetes

nyílt forrású elveket valló oldal. Alapvetően SketchUp [25] szoftverben készített épületmodellek közösségi használatára lett kitalálva, de számos más modell is található az oldalon, mint például állatok, növények, vagy éppen emberi modellek. Az *Artec 3D* pedig egy 3D szkennert gyártó. Weboldalán minta gyanánt számos 3D modell elérhető.

Az ezen munka során használt modellek OBJ formátumban [26] kerültek exportálásra. Ezt a Wavefront Technologies [27] fejlesztette ki eredetileg animálható térbeli vizualizációkhoz. Ebben az egyszerűnek mondható formátumban a „v” - vel kezdődő sorokban az első három szám jelenti az adott fájl által definiált felület pontjainak x , y , és z koordinátáit. Ilyen modellekből ebben a „hogyan” kérdésre fókuszáló keretrendszer kialakítását célzó tanulmányban 6 különböző objektum épült be a munkába. Ezek a modellek az általános emberi modell [28], a csontváz modell [29], a máj modell [30], a légzőszervi modell [31], az emésztőszervi modell [32], és a szív modell [33] voltak.

Az említett objektumoknak szükséges még megadni a megfelelő relatív permittivitás és fajlagos vezetőképesség paramétereit ahhoz, szimulációt lehessen futtatni. Erre alkalmas adatforrásnak bizonyult az olasz Országos Kutatási Tanács „Nello Carrara” Alkalmazott Fizika Intézetének adatbázisa [34]. Itt a WiFi-k között népszerűnek mondható 2,4 GHz-es frekvencia lett kiválasztva szimulációs frekvenciának. Az ehhez tartozó adatokat az 1. táblázat tartalmazza. Az emberi modell az izomzat értékeivel volt közelíthető annak nagy részaránya miatt.

1. táblázat

Objektum	$\sigma \left[\frac{1}{\Omega \cdot m} \right]$	$\varepsilon_r [-]$
Emberi modell	1,705	52,791
Csontváz modell	0,385	11,410
Máj modell	1,653	43,118
Légzőszervi modell	0,790	20,510
Emésztőszervi modell	2,167	62,239
Szív modell	2,216	54,918

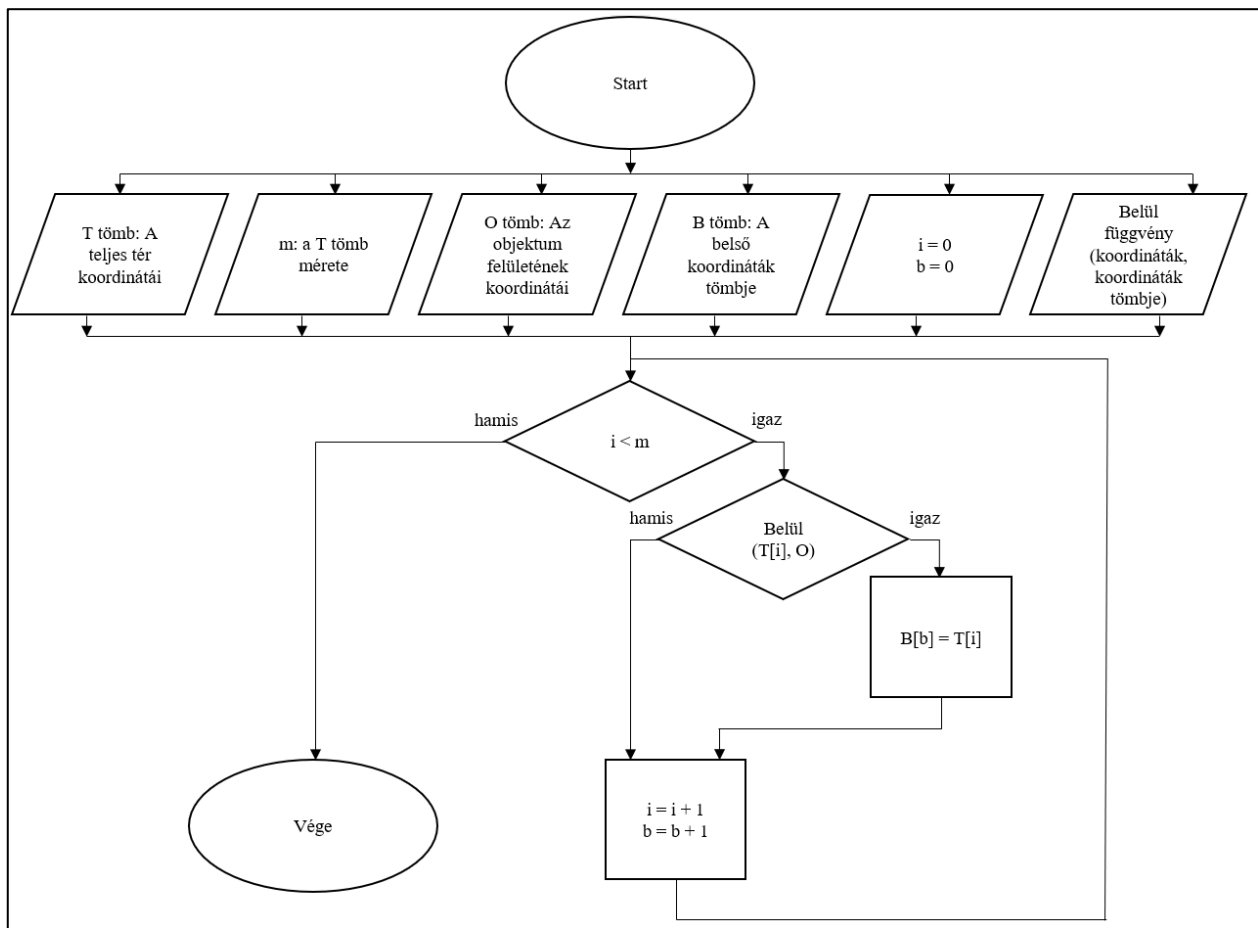
3.2 Az adatok feldolgozása

Ahogy az a 3.1 szakaszban is említésre került, a felhasznált 3D objektum modellek felületek pontjait tartalmazzák. Azonban az FDTD szimulációhoz az is lényeges, hogy az egyes objektumtestek belső pontjai melyek. Tehát a 3.1 szerint vázolt pontfelhőket a skálázáson, diszkrétizáláson és a megfelelő eltolásokon túl „ki kell tölteni”. Ez alól kivétel a csontváz modell, ahol a valóságot jól közelítő módon adottak a pontok.

Ezt a folyamatot a 3. ábrán feltüntetett algoritmus végzi egy objektum esetén. Bemenetei a következők:

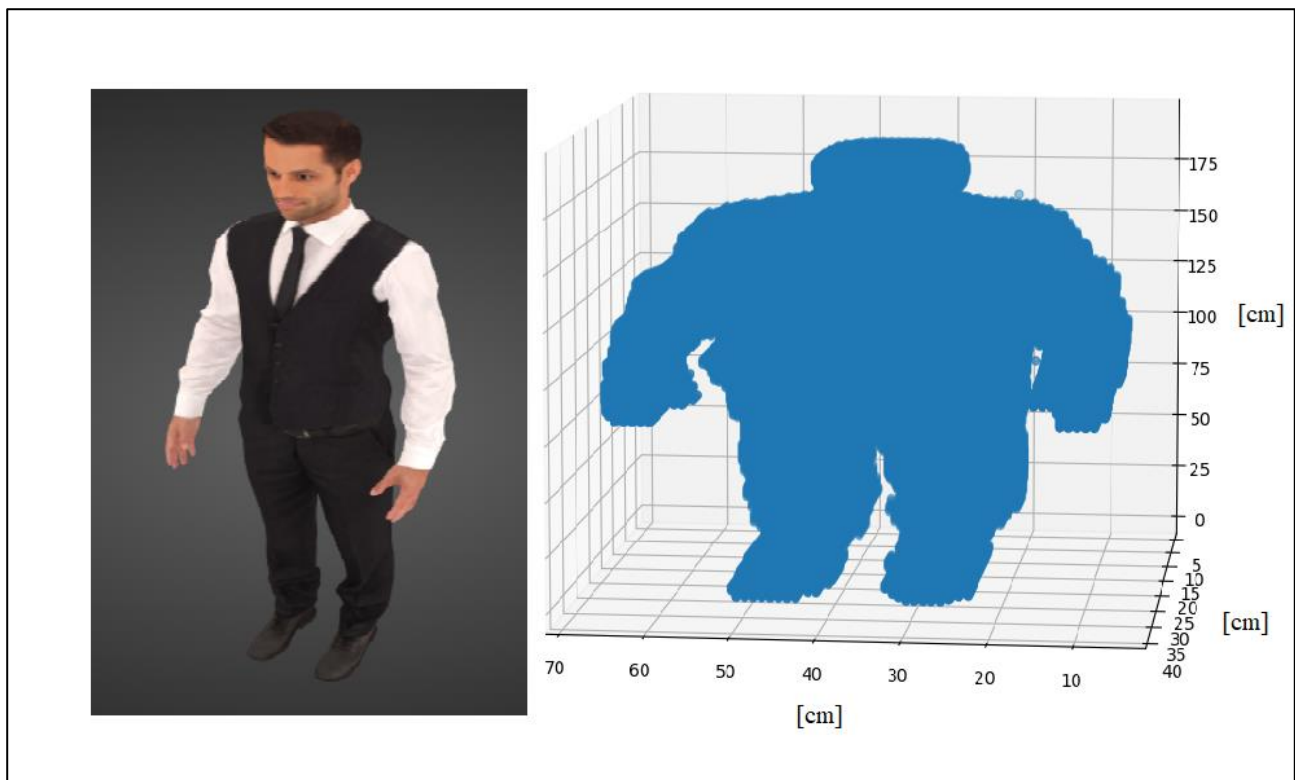
- A modellezett tér összes koordinátája a T tömbben.
- A T tömb mérete, azaz m .
- Az objektum felületének az OBJ formátumból származtatott pontjainak koordinátái az O tömbben.
- Egy B tömb azért, hogy tárolja az objektum belső pontjainak koordinátáit.
- Futóváltozók (i és b) a T és B tömbökhöz.
- Egy függvény, amely eldönti, hogy az adott O tömb által meghatározott felületen belül van-e egy pont.

Az egész folyamat egy ciklussal írható le. Amennyiben az i futóváltozó túllépi a T tömb m méretét, akkor a ciklusnak vége szakad. A ciklusban, ha $T[i]$ és O bemenetekkel a *Belül* függvény igazra értékelődik ki, akkor a B tömbbe bekerül a következő helyre T tömb i -edik eleme. Ezen következő hely megállapításában a b futóváltozó segít, amelyet az i -vel együtt a *Belül* utáni elágazás ágainak lefutása után mindenképpen növelni kell 1-gyel.



3. ábra: Pontfelhők belsejének meghatározási folyamata

Ezek közül a folyamatok közül természetesen a *Belül* függvény lefutása a legérdekesebb. Ez a következők szerint működik. Tulajdonképpen három darab térbeli négyzetes hasáiban vizsgálódik a $T[i]$ pont x , y és z koordinátái szerint. Ezeket a hasábokat úgy jelöli ki, hogy az alapjuk súlypontján áthaladó szimmetriatengelyeik párhuzamosak legyenek az x , y és z tengelyekkel. A hasábok alapja 5-ször 5-ös, így tulajdonképpen ez azt jelenti, hogy az x , y és z koordináták közül mindig az egyiket futtatni kell a teljes vizsgált térben a lehetséges értékeken, míg a másik kettőt egy ezen belüli ciklusban növelni, vagy csökkenteni kell 0-val, 1-gyel vagy 2-vel minden lehetséges, azaz összesen 25 féle, kombinációban. Ha mindegyik térbeli hasáb esetén talál az algoritmus az adott futóváltozó szerinti koordinátánál kisebb és nagyobb értéket is az O tömbben, akkor az adott pont belső pontnak számít. Ezzel a módszerrel az emberi modellből például a 4. ábra szerinti tömör pontfelhő készül.



4. ábra: A keretrendszerben használt emberi modell és tömör pontfelhője

Természetesen ez az algoritmus mindegyik objektumon elvégezhető és így 6 darab tömör pontfelhő kapható. Ezek, valamint a permittivitás és a vezetőképesség segítségével már minden bementi adat megfelelő formátumban áll rendelkezésre az *fdtd* számára.

3.3 Szimuláció Python környezetben

A teljes szimulációhoz alapvetően 4 könyvtár szükséges. A már említett *fdtd* könyvtár minden hivatkozott moduljával, az adatok elmentéséhez lényeges eredendően adatelemzéshez kifejlesztett *pandas* [35] könyvtár, a vizualizációt támogató *matplotlib* [36] könyvtár és a matematikai műveletekhez szükséges *numpy* [37] könyvtár.

A teljes program egyes részletei alapvetően 3 féle csoportba sorolhatók

- I. Vannak olyan részletek, amelyek teljes mértékben új kódként lettek létrehozva.
- II. Vannak olyan részletek is, amelyek az eredeti *fdtd* funkcióit használják, eköré épülő algoritmusok.
- III. Illetve vannak olyan megoldások is, ahol az eredeti *fdtd* került átírásra.

Ezen III. résszel használható ki igazán a nyílt forráskódúság nagy előnye, miszerint minden funkció és megoldás szabadon elérhető, értelmezhető és szükség esetén lokálisan módosítható. Az I. rész már lényegében tárgyalásra került a 3.2 szakasz kapcsán az adatmanipuláció tekintetében. A II. és III. pontokat a 3.3.1 és a 3.3.2 szakaszok tárgyalják.

3.3.1 Az eredeti *fdtd* funkcióinak használata

A szimuláció lényeges része a hullámhossz, a vákuumbeli fénysebesség és a cellaméret megadása, ugyanis ezek segítségével határozható meg az időlépés nagysága. Az elektromágneses tér frekvenciája 2,4 GHz, így a hullámhossza 0,1249 m, a fénysebesség vákuumban 299 792 458 m/s, a cellaméretet, azaz a modell finomságát pedig célszerű legfeljebb a hullámhossz tizedének választani a stabilitáshoz [3]. Ezt a választást az egyszerű felépíthetőség és az elv biztonságos betartása érdekében úgy tettem meg, hogy a cellaméret 1 cm lett. Ezeknek megfelelően, valamint [21] és [38] alapján az időlépés az alábbiak szerint számítandó:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{\sqrt{3} \cdot c} \quad (14)$$

ahol az eddig nem tárgyalt mennyiségek:

- Δt az időlépés [s] mértékegységben,
- Δs pedig a rács finomsága [cm] mértékegységben.

Ezzel az emberi modell egy 180 cm magas objektum lesz, amely egy szélesség, vastagság, magasság sorrendben értelmezett 72-szer 44-szer 200-as térben kerül elhelyezésre úgy, hogy a vastagság alatt a mellkast a háttal összekötő tengely értendő. Ezzel elérhető, hogy minden irányban 10-10 cm távolságra legyen a szimulációs rács széléhez legközelebbi pontja az emberi testnek a szimulációs rács szélétől. Ez a rács így az *fdtd.Grid* inicializációjaként jön létre. Az *fdtd.PML* paranccsal a rács bizonyos részei tökéletesen illesztett rétegekké alakíthatók [21]. Ez a rács szélénél lévő 5 cm-es rétegben került beállításra.

Az emberi modellnek és szerveinek beállítására egy az *fdtd* funkcióira építő saját függvény íródott. Ez azt teszi, hogy végigfut a 3.1 és 3.2 szakasz szerint leírt adatokon és az 1. táblázat sorrendjében beállítja azokat az *fdtd.Grid* objektumnak. Ezt az *fdtd.AbsorbingObject* osztály inicializálásával tudja megtenni, amely a létrehozásánál paraméterként éppen a relatív permittivitást és a vezetőképességet várja bemenetként.

Végül a futtatás előtt még a forrás beállítása a lényeges. Ezt [3] alapján úgy lehetett megvalósítani, hogy az összes szélesség-vastagság síkkal párhuzamos réteg esetén a síkban a (10, 10) koordinátájú pont közel végtelen relatív permittivitásúra ($\epsilon_r = 10^{19}$) és az alumíniummal megegyező vezetőképességűre ($\sigma = 37\,735\,849\text{ S/m}$) lett választva az *fdtd.AbsorbingObject* segítségével, kivéve a középső, azaz a 100. rétegben. Itt az *fdtd.PointSource* által olyan forrás lett létrehozva, amely ember nélküli háló esetén, a középső (36, 22, 100) pontban 181,26 A/m effektív mágneses térerősség értéket produkál, ami [39] szerint a 2 GHz-es frekvenciáig érvényes képlettel kiszámított érték. Azért ez a közelítés került alkalmazásra mert 2 GHz felett nincs megadva határérték mágneses térerősségre és egyébként is ezen munka fő fókusza a modellezés folyamata. Ez az érték a 16 – 23 periódusok átlagolásából került kiszámításra, ahogy a 3.3.2 szakasz értékei is. Ennek mikéntje ott kerül bemutatásra.

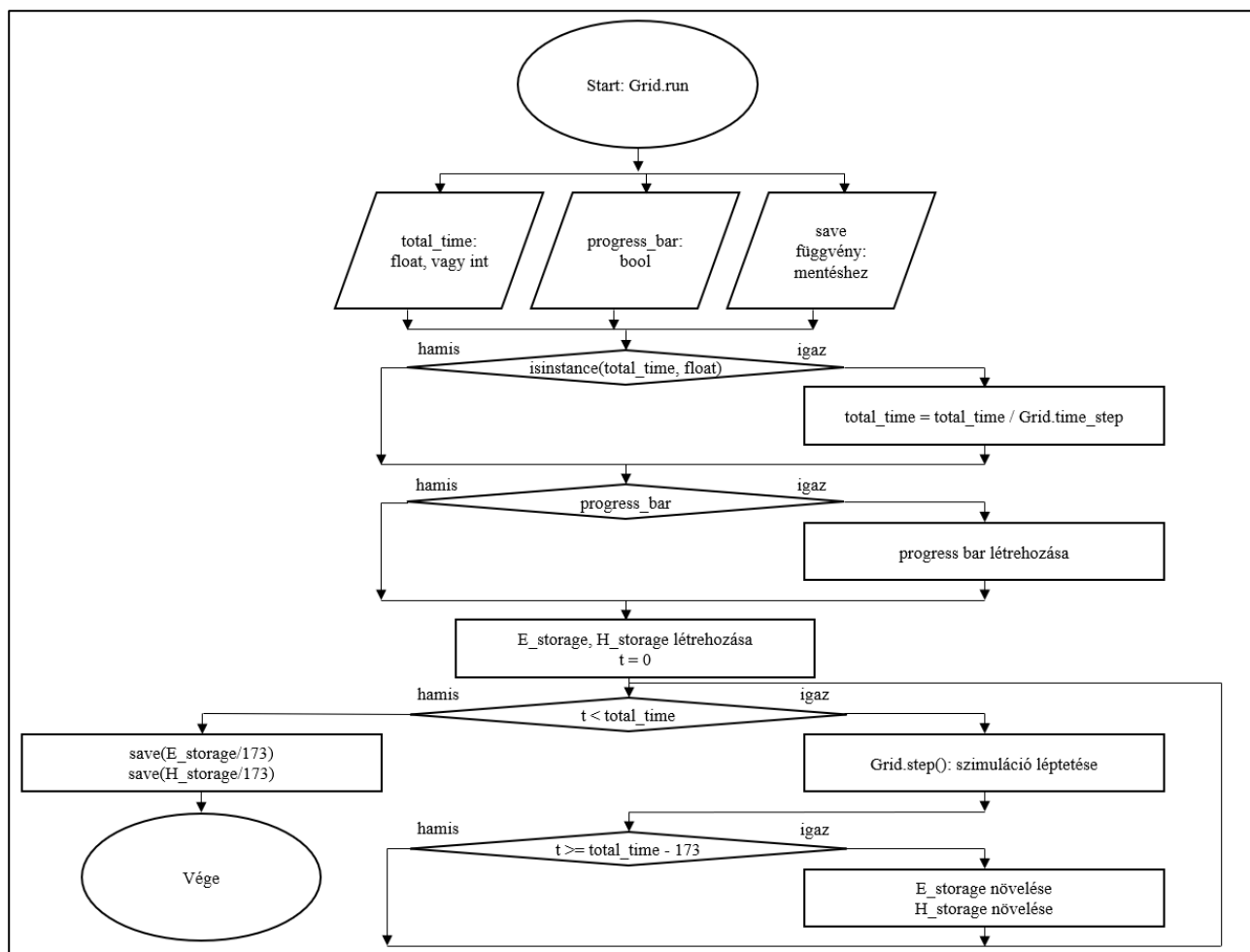
3.3.2 Az eredeti *fdtd* funkcióinak módosított használata

Az eddigieket már csupán a *Grid* osztály *run* függvénye követi és ezzel el is indulhat a futtatás. Ennek bemeneti paramétere a *total_time*, amelynél meg lehet adni, hogy hány időlépés legyen a teljes futás, illetve a *progress_bar* bool változó, amely alapértelmezés szerint *True* értéket vesz fel és ekkor megjelenik a futás százalékos állapota. A 2,4 GHz frekvenciához $4,16 \cdot 10^{-10}$ s periódusidő tartozik. Ennek 8-szorásában pedig a (14) egyenlet alapján számított időlépés 173-szor van meg. Tehát a $16 + 8$ periódus $3 \cdot 173$ időlépésből jön ki, így legalább ennyit kell beállítani a *total_time* változónak.

Az adatok mentése kapcsán használható ki a nyílt forráskódúság nagy előnye. Ugyanis elérhető, hogy ne csupán egy végső pillanatnyi állapotát lehessen menteni a rendszernek, hanem vizsgálni lehessen egy hosszabb időszak effektív értékét. Ezt az *fdtd* könyvtár *grid.py* moduljának módosításával lehet elérni. A *grid.py*-ban a *Grid* osztály *run* függvénye módosítás nélkül csupán a következőket tenné:

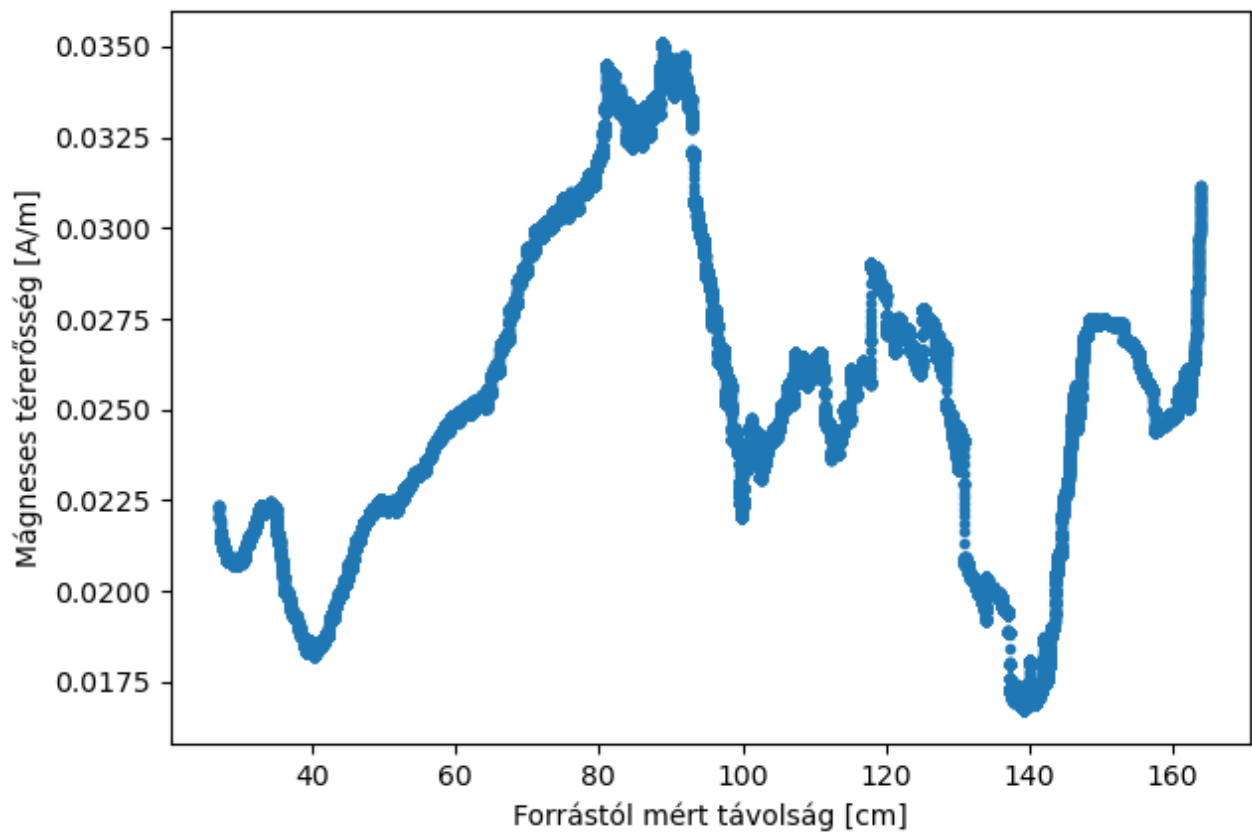
1. Amennyiben a felhasználó *float*-ként adta meg a *total_time*-ot, a *run* a *float*-ot nem időlépésként, hanem szimulációs időként kezelné, és kiszámítaná az időlépés nagyságával való osztással, hogy hány időlépésig fusson a szimuláció.
2. Erre még létrehozna egy *range*-et.
3. Illetve a *progress_bar* *True* értéke esetén létrehozná azt.
4. Végül pedig ebben a *range*-ben elindítaná a futtatást.

A módosított futtatás esetén az első három pont változatlan, azonban a negyedik jelentősen kibővül, változik. Még az utolsó pont előtt célszerű létrehozni egy *H_storage* és egy *E_storage* *numpy* tömböket. Ezek inicializáláskor 72-szer, 44-szer, 200-as *numpy.zeros* függvénnyel létrehozott csupa 0-t tartalmazó tömbök. A cikluson belül pedig, ha az adott iterációban az utolsó 173 időlépésben jár a kód, akkor az osztály *H* és *E* attribútumai által tárolt térerősség értékek négyzetösszegeinek gyökeit hozzáadja a *H_storage*, illetve az *E_storage* tömbökhöz. Végül az utolsó iteráció után pedig elmenti e két tömb 173-ad részét. A teljes folyamat az 5. ábrán figyelhető meg.

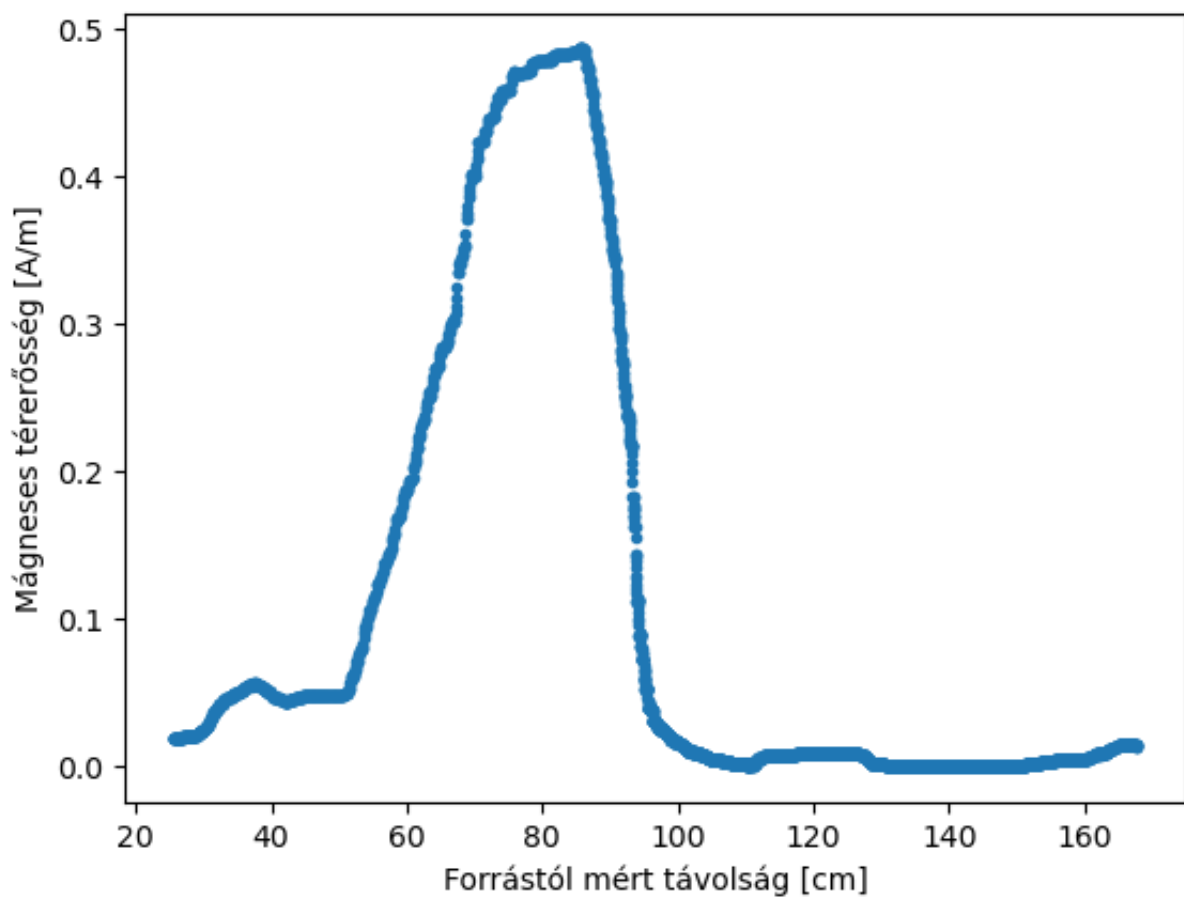


5. ábra: A futtatás módosított függvényének működése

Ebből a folyamatból egyedül a save függvény leírása az, ami még nem került említésre. Ez egy *try – except* - tel megpróbálja létrehozni az adott *time_step*-ről elnevezett mappát, de ha az létezik, akkor nem írja felül. 0-tól 44-ig futtat egy ciklust, ahol minden szélesség - magasság rétegét elmenti az átadott tömbnek. Ez a mentés a *pandas.DataFrame.to_excel* paranccsal történik a tömbök *DataFrame*-mé alakítása után. Végül az ábrázolás is itt történhet meg. A *matplotlib scatter* függvénye segítségével például ábrázolhatók a mágneses térerősség értékek az emberi testre és a csontozatra. A 6. és 7. ábra ezeket jeleníti meg a forrástól való távolság függvényében. A zaj szűrésének érdekében az ábrázolásnál a teljes adatmennyiség 10%-ának megfelelő számmal, mozgóátlag számítással történt az ábrázolás. Megfigyelhető, hogy az emberi testen belül jóval kisebb lesz a mágneses térerősség értéke, mint anélkül lenne a rácsrendszerben. Egy ilyen számításra képes keretrendszer rendelkezésre állása esetén a szakértők már levonhatják a megfelelő következtetéseket.



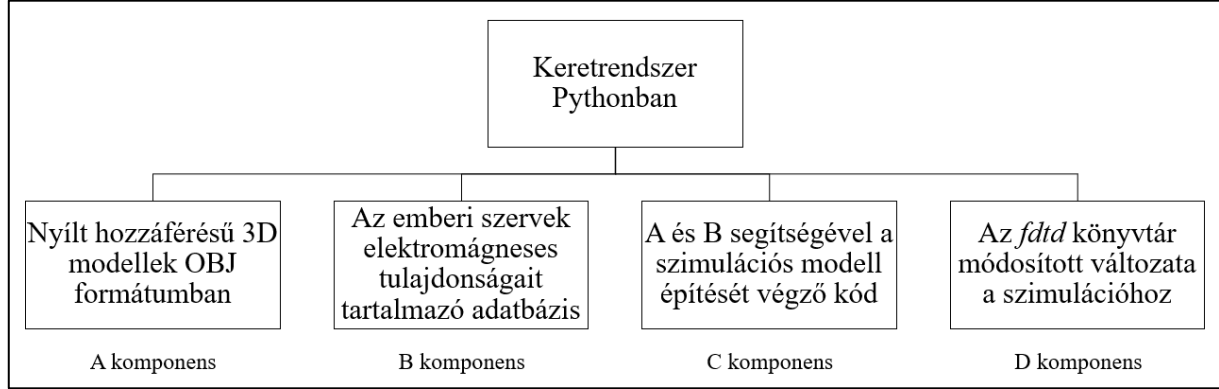
6. ábra: Az izomzatban megjelenő mágneses térerősség a forrástól mért távolság függvényében



7. ábra: Az csontokban megjelenő mágneses térerősség a forrástól mért távolság függvényében

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben áttekintésre került az FDTD szimulációnak számos alkalmazási példája és a szimuláció alapjai. Ezekből az alapokból, azaz Faraday- és Ampère-törvényből kiindulva konkrét háromdimenziós számítási módszer került leírásra a megfelelő numerikus számításokhoz lényeges szimulációs mértékegységekben. A szimuláció elvégzéséhez szükséges adatmenedzsment hangsúlyos szerepet kapott jelen munkában. Részletesen kifejtésre került a felhasznált nyílt hozzáférésű 3D modellek és az elektromágnesesség szempontjából jellemző paraméterek adatfeldolgozása. Az ezen adatokból és folyamatokból felépülő keretrendszert a 8. ábra szemlélteti.



8. ábra: Keretrendszer struktúrája

A teljes keretrendszer Pythonban van összefogva és alapvetően négy komponensből épül fel. A két fő bemeneti komponens a 3D modelleket tartalmazó (A) és az azok villamos paramétereit tartalmazó (B) komponens. Ezek egy harmadik (C) komponens segítségével épülnek szimulációs modellé. A szimulációt pedig a negyedik (D) komponens végzi.

FÜGGELÉK

Az F1 függelék a 2.2.2 fejezet szerinti x-tengely menti mennyiségekre, a F2 függelék pedig az y-tengely menti mennyiségekre vonatkozik.

F1 Az FDTD szimuláció x-tengely menti mennyiségeinek számítása

$${}_x E_s^{\Delta,d} = \frac{1}{c \cdot \epsilon_r} {}_x H_s^{rot,d} - \frac{\sigma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} {}_x E_s^{avg,d} \quad (15)$$

$${}_x E_s^{\Delta,d} = \frac{{}_x E_s^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k+\frac{1}{2}) - {}_x E_s^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k+\frac{1}{2})}{\Delta t} \quad (16)$$

$${}_x H_s^{rot,d} = \frac{{}_z H_s(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}) - {}_z H_s(i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}) - {}_y H_s(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}) + {}_y H_s(i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2})}{\Delta x} \quad (17)$$

$${}_x E_s^{avg,d} = \frac{{}_x E_s^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k+\frac{1}{2}) + {}_x E_s^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k+\frac{1}{2})}{2} \quad (18)$$

$${}_x H_s^{\Delta,d} = \frac{1}{c} {}_x E_s^{rot,d} \quad (19)$$

$${}^n_x H_s^{\Delta,d} = \frac{{}^{n+1}_x H_s\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - {}^n_x H_s\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta t} \quad (20)$$

$${}^n_x E_s^{rot,d} = \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_y E_s\left(i + \frac{1}{2}, j + 1, k\right) - {}^{n+\frac{1}{2}}_y E_s\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - {}^{n+\frac{1}{2}}_z E_s\left(i + 1, j + \frac{1}{2}, k\right) + {}^{n+\frac{1}{2}}_z E_s\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta x} \quad (21)$$

F2 Az FDTD szimuláció y-tengely menti mennyiségeinek számítása

$${}^n_y E_s^{\Delta,d} = \frac{1}{c \cdot \varepsilon_r} {}^n_y H_s^{rot,d} - \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} {}^n_y E_s^{avg,d} \quad (22)$$

$${}^n_y E_s^{\Delta,d} = \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_y E_s\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) - {}^{n-\frac{1}{2}}_y E_s\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta t} \quad (23)$$

$${}^n_y H_s^{rot,d} = \frac{{}^n_x H_s\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - {}^n_x H_s\left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - {}^n_z H_s\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) + {}^n_z H_s\left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \quad (24)$$

$${}^n_y E_s^{avg,d} = \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_y E_s\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) + {}^{n-\frac{1}{2}}_y E_s\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{2} \quad (25)$$

$${}^n_y H_s^{\Delta,d} = \frac{1}{c} {}^n_y E_s^{rot,d} \quad (26)$$

$${}^n_y H_s^{\Delta,d} = \frac{{}^{n+1}_y H_s\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - {}^n_y H_s\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta t} \quad (27)$$

$${}^n_y E_s^{rot,d} = \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_z E_s\left(i + \frac{1}{2}, j + 1, k\right) - {}^{n+\frac{1}{2}}_z E_s\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - {}^{n+\frac{1}{2}}_x E_s\left(i + 1, j + \frac{1}{2}, k\right) + {}^{n+\frac{1}{2}}_x E_s\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta y} \quad (28)$$

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

A linkek utolsó elérése: 2022. 06. 07.

- [1] J.-M. Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2015.
- [2] W. C. Gibson, The Method of Moments in Electromagnetics, CRC Press, New York, 2022.
- [3] J. E. Houle, D. M. Sullivan, Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method with Python, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2020.
- [4] K. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, IEEE, 1966, vol. 14, no. 3, pp. 302-307.
- [5] A. Taflove, Application of the Finite-Difference Time-Domain Method to Sinusoidal Steady-State Electromagnetic-Penetration Problems, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 1980, vol. EMC-22, no. 3, pp. 191-202.

- [6] E. L. Tan, Fundamental Implicit FDTD Schemes for Computational Electromagnetics and Educational Mobile APPS (Invited Review), Progress in Electromagnetics Research, The Electromagnetics Academy, 2020, vol. 168., pp. 39-59.
- [7] F. L. Teixeira, FDTD/FETD Methods: A Review on Some Recent Advances and Selected Applications, Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Brazilian Microwave and Optoelectronics Society, 2007, vol. 6, no. 1, pp. 83–95.
- [8] T. Tanaka, Y. Baba, Y. Tsujimoto, N. Tsukamoto, FDTD Electromagnetic and Thermal Simulation of a Metal Oxide Varistor Element Considering the Temperature Dependence of Its Resistivity, Electricity, MDPI, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 158-167.
- [9] L. Cao, S. Hao, Y. Zhao, and C. Wang, High-Power Electromagnetic Pulse Effect Prediction for Vehicles Based on Convolutional Neural Network, Electronics, MDPI, 2022, vol. 11, no. 9.
- [10] S. Mohammadi, H. Karami, M. Azadifar, F. Rachidi. On the Efficiency of OpenACC-aided GPU-Based FDTD Approach: Application to Lightning Electromagnetic Fields, Applied Sciences, MDPI, 2020, vol. 10, no. 7.
- [11] A. Choroszucho, J. M. Stankiewicz, Using FDTD method to the analysis of electric field intensity inside complex building constructions, Electrical Engineering, Poznan University of Technology Academic Journals, 2019, no. 97, pp. 39–48.
- [12] T. Akiyoshi, R. Farhad, R. Marcos, A Technique for Calculating Voltages Induced on Twisted-Wire Pairs Using the FDTD Method, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 2017, vol. 59, no. 1, pp. 301-304.
- [13] D. Yan, L. Sun, Y. Sun and B. Jiang, The FDTD Analysis of EMI in Motor Drive System, 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, IEEE, 2006, pp. 8074-8078.
- [14] L. Zhang, Y. Du, D. Wu, FDTD simulation of magnetic heat induction on human body subject, 2015 31st International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, IEEE, 2015, pp. 1-2.
- [15] J. Park, J.-W. Baek, K.-Y. Jung, Accurate and Numerically Stable FDTD Modeling of Human Skin Tissues in THz Band, IEEE Access, IEEE, 2022, vol. 10, pp. 41260 – 41266.
- [16] J.-W. Baek, D.-K. Kim, K.-Y. Jung, Finite-Difference Time-Domain Modeling for Electromagnetic Wave Analysis of Human Voxel Model at Millimeter-Wave Frequencies, IEEE Access, IEEE, 2018, vol. 7, pp. 3635 – 3643.
- [17] K. Masumnia-Bisheh, K. Forooghi, M. Ghaffari-Miab, C. M. Furse, Geometrically Stochastic FDTD Method for Uncertainty Quantification of EM Fields and SAR in Biological Tissues, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, IEEE, 2019, vol. 67, pp. 7466-7475.
- [18] K. Y. Elwasife, S. A. Abuishaiba, M. M. Shabat, 3D-FDTD Head Model Exposure to Electromagnetic Cellular Phones Radiation, American Journal of Electromagnetics and Applications, Science Publishing Group, 2018, vol. 6, no. 2.
- [19] I. Karatsi, S. Bakogianni, S. Koulouridis, SAR and thermal distribution of pregnant woman and child inside elevator cabin, International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Cambridge University Press, 2022, pp. 1-14.
- [20] A. Taflove, S. C. Hagness, M. Piket-May, Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, 2004, pp. 629-669.
- [21] F. Laporte, fdtd, <https://github.com/flaport/fdtd>
- [22] Clara.io, <https://clara.io>
- [23] 3D Warehouse, <https://3dwarehouse.sketchup.com>
- [24] Artec 3D, <https://www.artec3d.com>
- [25] SketchUp, <https://www.sketchup.com>
- [26] OBJ, <https://www.iana.org/assignments/media-types/model/obj>
- [27] Wavefront Technologies, <http://www.wft.bz>
- [28] Emberi modell: Meet Bob, <https://clara.io/view/2975f7e6-a8a6-4f3a-8f41-22a2e5ace461>

- [29] Csontváz modell: Skeleton, <https://clara.io/view/70265cfc-7acf-4e6d-9f3d-00a36940463c>
- [30] Máj modell: liver, human, <https://3dwarehouse.sketchup.com/model/f8cb441d-798c-4200-97e2-a15f56e7a172/liver-human?login=true>
- [31] Légzőszervi modell: Lungs, <https://clara.io/view/7e37e396-e925-44f9-b09a-1b11703bdaca>
- [32] Emésztőszervi modell: Guts, <https://3dwarehouse.sketchup.com/model/49751fd293a0770be4b68d3b17c43658/Guts>
- [33] Szív modell: Bovine heart, <https://www.artec3d.com/3d-models/bovine-heart>
- [34] “Nello Carrara” Institute of Applied Physics: Calculation of the Dielectric Properties of Body Tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz, <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php>
- [35] The pandas development team, pandas-dev/pandas: Pandas, Zenodo, 2020, 10.5281/zenodo.3509134
- [36] J. D. Hunter, Matplotlib: A 2D Graphics Environment, Computing in Science & Engineering, IEEE, 2007, vol. 9, no. 3, pp. 90-95.
- [37] C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt, R. Gommers, P. Virtanen, D. Cournapeau, E. Wieser, J. Taylor, S. Berg, N. J. Smith, R. Kern, M. Picus, S. Hoyer, M. H. van Kerkwijk, M. Brett, A. Haldane, J. F. del Río, M. Wiebe, P. Peterson, P. Gérard-Marchant, K. Sheppard, T. Reddy, W. Weckesser, H. Abbasi, C. Gohlke, T. E. Oliphant, Array programming with NumPy, Nature, Springer Science and Business Media, 2020, vol. 585, pp. 357-362.
- [38] R. Courant, K. O. Friedrichs, H. Lewy, Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik, Mathematische Annalen, 1928, vol. 100. pp. 32-74.
- [39] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz), Health Phys., 2020, vol. 118. pp. 483–524.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem docensének, **Dr. Tamus Zoltán Ádámnak**, hogy a Villamosság élettani hatásai című tárgy keretein belül támogatta ezt a munkát.

Periodikusan változó mágneses tér élettani hatásainak elemzésére alkalmas időtartománybeli véges differencia módszert használó keretrendszer kialakítása nyílt forráskódú platformon nyílt hozzáférésű adathalmaz segítségével

Development of a Framework Using Finite-Difference Time-Domain Method for The Analysis of The Health Effects of a Periodic Magnetic Field on an Open-Source Platform Using an Open Access Dataset

BÉKÉSI Gergő Bendegúz

bekesigergobendeguz@edu.bme.hu

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Budapest, Műegyetem rakpart. 3, 1111, + 36 30 353 5936, <https://hu.linkedin.com/in/gergobekesi>

Absztrakt: Az infokommunikációs eszközök térhódításával egyre nagyobb hangsúlyt kell helyezni azok élettani hatásainak vizsgálatára. Erre alkalmas az FDTD módszer, amellyel kapcsolatban az elmúlt évtizedet intenzív kutatás jellemezte. Számos publikáció született ezzel kapcsolatban, azonban eddig, különösen a hazai irodalomban kevésbé kerültek fókuszba a modellezéshez felhasználható nyílt forráskódú eszközök és az ezekkel építhető rendszerek előnyei. Ezt a hiányt hivatott pótolni ez a munka.

Abstract: With the proliferation of infocommunication tools, an increasing emphasis is being placed on their physiological effects. The FDTD method, for which the last decade has been intensively researched, is suitable for this. Numerous papers have been published in this field, but so far, especially in the Hungarian literature, there has been little focus on the advantages of open-source tools that can be used for modelling and the systems that can be built with them. This work is intended to fill this gap.

Kulcsszavak: FDTD szimuláció, nyílt forrású, esettanulmány, elektromágneses tér, élettani hatás

1. BEVEZETÉS

A mágneses tér jelenléte egy természetes dolog a környezetünkben. Az emberi szervezetre a Föld saját mágneses tere nincs negatív hatással, annak nem okoz problémát. Azonban a technológiai fejlődés, a gépesítés, a növekvő elektrifikáció és a különböző infokommunikációs eszközök nagyütemű terjedése miatt kialakuló mesterséges mágneses terek élettani hatás szempontjából való vizsgálata kiemelten fontos.

Erre a vizsgálatra legtöbbször különböző numerikus szimulációkat alkalmaznak, hiszen a komplex valós rendszerek sokszor nem írhatók le könnyen analitikusan. Három fő módszer családot érdemes megemlíteni ezen a téren: a véges elem- [1], az integrálegyenleten alapuló peremelem- vagy momentum- [2] és a véges differencia módszereket [3]. Ezek közül ez a munka az utolsóra, az FDTD (Finite-Difference Time-Domain) módszerre fókuszál.

A módszer alapjait Yee [4] fektette le. Ő alkalmazott először a Maxwell-egyenletek megoldására térben és időben véges rácson véges differenciáláson alapuló operátorokat. Az FDTD fogalmat azonban csak később, Taflové [5] használta, aki dielektromos testekben és üregekkel rendelkező fémtestekben végzett szimulációkat ± 1 dB pontossággal. Ezzel a módszerrel számos elektromágneses térhez kapcsolódó problémát lehet szimulálni, megoldani. Tan [6] nemcsak a különböző számítások, hanem a tudás továbbadásának szempontjából is alapos áttekintést készített a tématerületről és különböző megértést segítő mobilalkalmazásokra is kitért. Teixeira [7] pedig néhány olyan fontosabb fejlesztést foglalt össze, mint például a PML (perfectly matched layer) használata vagy az alkalmazott rács finomítása.

Számos kutatási területen használnak FDTD szimulációt. Tanaka és társai [8] metál-oxid varisztorok elektromágneses terét szimulálták. Hőmérsékletérzékeny cellákat alkalmaztak véges hálójukban és a számításuk eredményeként többek között a hőmérsékleteloszlásra tudtak következtetni. Cao és társai [9] az FDTD módszerrel vetnek össze egy konvolúciós neurális hálós megoldáson alapuló nagy teljesítményű

elektromágneses impulzusokat előre jelző modellt földi járművek esetében. Mohammadi és társai [10] villámok elektromágneses szimulációját vizsgálják a tárgyalta módszerrel GPU támogatású gyorsítás esetében, úgy, hogy nagy pontosság mellett húszszoros gyorsítás elérésére képesek. Choroszucho és Stankiewicz [11] épületek vasbeton szerkezetének hatását vizsgálták az épületekben wifi-jel hatására kialakuló elektromágneses térre. A szimulációhoz használt környezetben dielektrikumok és vezetők segítségével modelleztek négy jellemző épülettípust. Tatematsu és társai [12] alállomások és erőművek kisfeszültségű vezérlőáramkörökkel kapcsolatban alkalmaztak FDTD szimulációt. Ennek segítségével voltak képesek elemezni bizonyos túlfeszültség-védelmi működéseket. Yan és társai [13] elektromágneses interferencia problémákat vizsgáltak szigetelt kapujú bipoláris tranzisztorok kikapcsolásánál FDTD-vel. Impulzus szélesség modulációs motorvezérlés esetén 10 dB-nél kisebb hibát sikerült elérniük a módszerrel a tapasztalati adatokhoz képest.

Élettani hatások terén is számos alkalmazás kerül elő. Zhang és társai [14] a mágneses indukció hatására keletkező hő mennyiségét vizsgálják az emberi testben GPU alapú módszerrel. Park és társai [15] 0,25 – 1,05 THz tartományban szimulálták az emberi bőr viselkedését elektromágneses tér hatására egészséges bőr, bazális sejtes karcinómás bőr, illetve diszpláziás és normál nevus esetében. Baek és társai [16] FDTD módszerrel végeztek vizsgálatot milliméteres hullámhossztartományban emberi rács modellen. De található publikáció sztochasztikus szimulációról [17], mobiltelefon egészségügyi hatásairól [18] és terhes nőkre gyakorolt elektromágneses hatás elemzéséről [19] is a témában.

A cikk hátralévő része a következők szerint épül fel. Először áttekintésre kerül az FDTD módszer és annak alapja a 2. szakaszban. Ezt követően a 3. szakaszban bemutatásra kerülnek a fejlesztett keretrendszer részletei. A 4. szakaszban pedig a munka összegzése olvasható.

2. AZ FDTD MÓDSZER

Ebben a fejezetben az FDTD módszer számítási alapjai és a szimulációhoz szükséges struktúra fontos általános jellemzői kerülnek bemutatásra.

2.1 Az FDTD szimuláció alapját képező fizikai törvények

Az FDTD módszer alapja a Faraday-törvény és az Ampère-törvény használata. Ezek hagyományosan az alábbi alakúak veszteséges, paramágneses anyagok esetén:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \nabla \times H - \frac{\sigma \cdot E}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times E \quad (2)$$

ahol:

- E a villamos térerősség, mértékegysége $\left[\frac{V}{m}\right]$,
- t az idő, mértékegysége $[s]$,
- ϵ_0 a vákuum permittivitása, mértékegysége $\left[\frac{A \cdot s}{V \cdot m}\right]$,
- ϵ_r a relatív permittivitás, mértékegység nélküli arányszám $[-]$,
- H a mágneses térerősség, mértékegysége $\left[\frac{A}{m}\right]$,
- σ a fajlagos vezetőképesség, mértékegysége $\left[\frac{1}{\Omega \cdot m}\right]$,
- μ_0 pedig a vákuum permeabilitása, mértékegysége $\left[\frac{V \cdot s}{A \cdot m}\right]$.

Azonban FDTD szimulációnál a megfelelő PML választás szempontjából fontos, hogy hasonló nagyságrendűek legyenek az egyenletekben használt E és B értékek. Éppen ezért $E_{\text{szimuláció}}$, és $B_{\text{szimuláció}}$ a vákuum permittivitás gyökével és a vákuum permeabilitás gyökével való szorzásokkal kaphatók meg. Ennek megfelelően a Faraday-törvény és az Ampère-törvény az alábbi alakban írható fel:

$$\frac{\partial E_{\text{szimuláció}}}{\partial t} = \frac{1}{c \cdot \epsilon_r} \nabla \times H_{\text{szimuláció}} - \frac{\sigma \cdot E_{\text{szimuláció}}}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \quad (3)$$

$$\frac{\partial H_{\text{szimuláció}}}{\partial t} = -\frac{1}{c} \nabla \times E_{\text{szimuláció}} \quad (4)$$

ahol az eddig nem tárgyalt mennyiségek:

- $E_{\text{szimuláció}}$ a villamos térerősség a szimuláció mértékegységében $\left[\frac{V^{\frac{1}{2}} \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{m^{\frac{3}{2}}} \right]$, a továbbiakban E_s jelöléssel,
- $H_{\text{szimuláció}}$ a mágneses térerősség a szimuláció mértékegységében $\left[\frac{V^{\frac{1}{2}} \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{m^{\frac{3}{2}}} \right]$, a továbbiakban H_s jelöléssel,
- c pedig a fénysebesség, mértékegysége $\left[\frac{m}{s} \right]$.

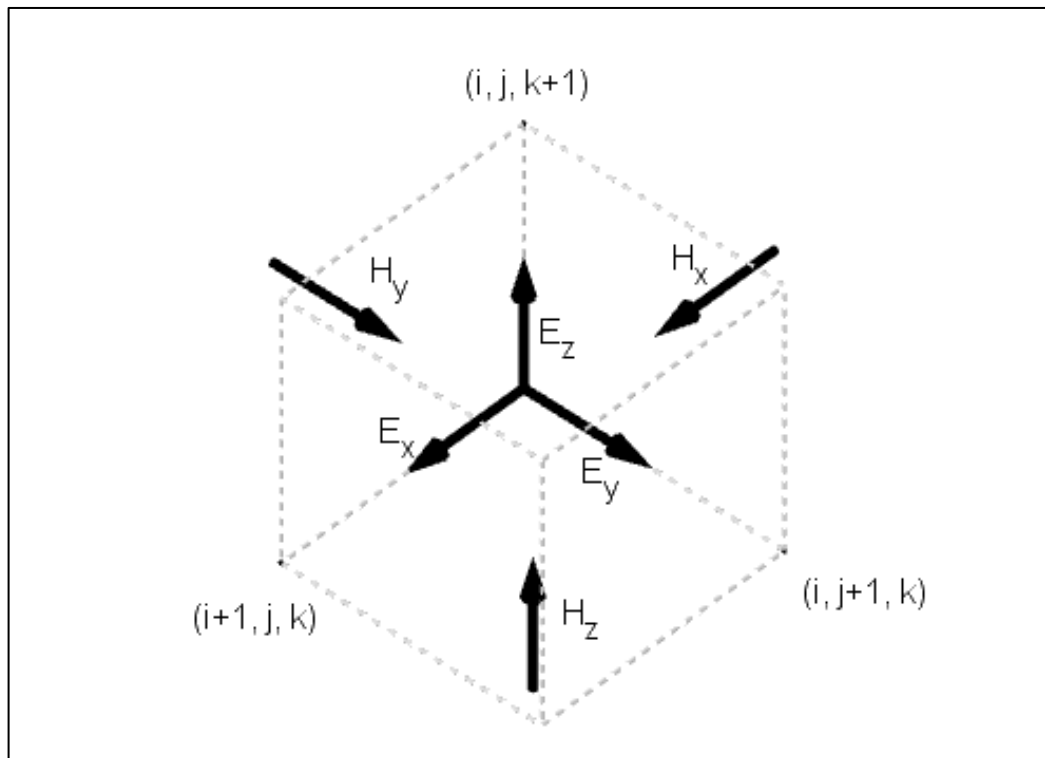
Ezek a módosított alakban felírt törvények önmagukban még nem alkalmasak elektromágneses jelenségek szimulációjára. Ehhez el kell végezni a megfelelő diszkretizálást.

2.2 Az FDTD szimuláció számítási módszerei

Ebben a fejezetben kerülnek bemutatásra a korábban leírt törvények diszkretizált alakjai. Ehhez azonban elengedhetetlen a megfelelő időbeli és térbeli diszkretizálás mikéntjének ismerete.

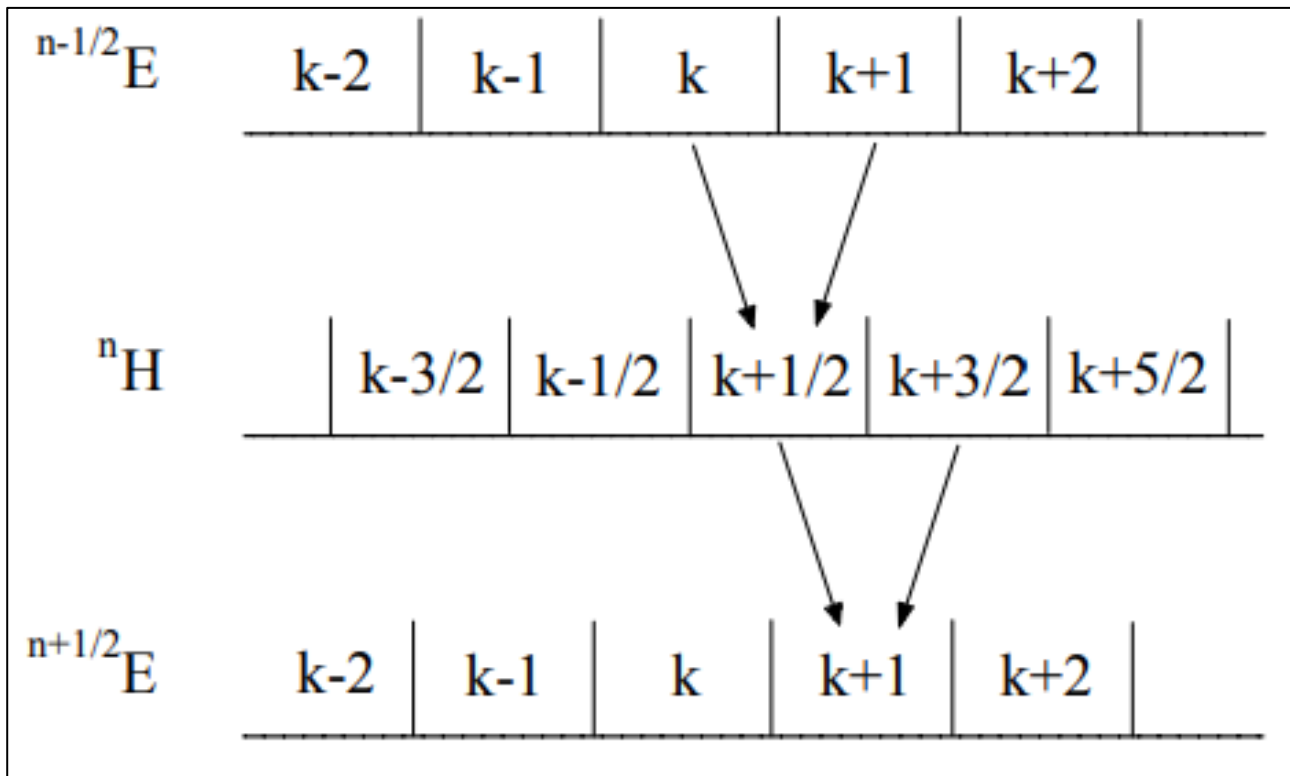
2.2.1 A szimulációhoz szükséges rács és tulajdonságai

Az FDTD szimuláció koncepciójának fontos része az úgynevezett Yee cella [4] alkalmazása. Ez az 1. ábrán figyelhető meg a villamos mező és a mágneses mező komponenseinek feltüntetésével.



1. ábra: Yee cella

Minden modellezendő objektum ilyen cellákból épül fel és az ezekből kialakuló rácsra írandó majd fel a Faraday- és az Ampère-törvény diszkretizált alakban. Minden egyes rácskockához tartoznak bizonyos paraméterek. A (3) és (4) egyenleteknek megfelelően ezek a paraméterek a relatív permittivitás és a fajlagos vezetőképesség. Egy ilyen rácsrendszeren a számítások időben és térben is egymásbaágyazottak. Ezt jól bemutatja a 2. ábra.



2. ábra Villamos- és mágneses télerősség időbeli átlapolása

Tehát a villamos télerősség értékei mindig tört, a mágneses télerősség értékei pedig mindig egész pillanatokban értelmezettek a szimuláció során. Ettől függetlenül természetesen a villamos télerősség értékek is kiszámíthatók egész időpillanatokra átlagolással, azonban ez csak a didaktikai szempontból lesz lényeges a 2.2.2 szakaszban.

Érdemes még megjegyezni itt a PML használatot. A PML, vagy tökéletesen illesztett réteg, abból az okból szükséges, hogy el lehessen kerülni a modellezett tartomány széléről való visszaverődést. Ez tulajdonképpen nevezhető akár a modell egy „elnyelő peremfeltételének”, hiszen fizikailag a modell szélein, annak külső részén található. Ezekben a középponttól távolabbi cellákban úgy kerülnek megválasztásra az egyes anyagparaméterek, hogy a bejutó elektromágneses hullám fokozatosan elnyelésre kerüljön a lehető legkisebb szórással. Taflové és társai [20] részletes összefoglalót készítettek a PML használatáról. Jelen munkában az úgynevezett unaxiális anizotróp PML (UPML) kerül felhasználásra.

2.2.2 Diszkretizált Faraday- és Ampère-törvény

Így már bemutatathatók a korábban leírt törvények diszkretizált alakjai. Ehhez a következő jelölési konvenció társul. A ${}^n_zV_s^i$ mennyiség a szimuláció (s) valamelyik vektormennyiségének (V^i , a szimuláció során E^i vagy H^i), z tengely menti komponense az n . időpillanatban, a korábban említett átlapolások figyelembevételével. Az „ i ” használata opcionális. Elhagyása esetén az adott télerősség értékről beszélünk, míg az „ avg, d ”, „ rot, d ” vagy „ Δ, d ” esetén az alábbiak szerint kifejtett diszkrét mennyiségek átlagáról, rotációjáról vagy különbségéről.

$${}^n_zE_s^{\Delta, d} = \frac{1}{c \cdot \epsilon_r} {}^n_zH_s^{rot, d} - \frac{\sigma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} {}^n_zE_s^{avg, d} \quad (5)$$

$$n_z E_s^{\Delta,d} = \frac{n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) - n^{-\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta t} \quad (6)$$

$$n_{H_s}^{rot,d} = \frac{n_{yH_s} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - n_{yH_s} \left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - n_{xH_s} \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) + n_{xH_s} \left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \quad (7)$$

$$n_z E_s^{avg,d} = \frac{n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) + n^{-\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{2} \quad (8)$$

$$n_{H_s}^{\Delta,d} = \frac{1}{c} n_z E_s^{rot,d} \quad (9)$$

$$n_{H_s}^{\Delta,d} = \frac{n^{+1} H_s \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - n_{H_s} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta t} \quad (10)$$

$$n_z E_s^{rot,d} = \frac{n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i + \frac{1}{2}, j + 1, k\right) - n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i + 1, j + \frac{1}{2}, k\right) + n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta z} \quad (11)$$

Ezekből pedig kifejezhetők a szimuláció következő villamos és mágneses térerősség értékei.

$$n^{+\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) = \frac{\left(1 - \frac{\sigma \cdot \Delta t}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}\right) \cdot n^{-\frac{1}{2}} E_s \left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{c \cdot \epsilon_r} n_{H_s}^{rot,d}}{1 + \frac{\sigma \cdot \Delta t}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} \quad (12)$$

$$n^{+1} H_s \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) = n_{H_s} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) + \frac{\Delta t}{c} n_z E_s^{rot,d} \quad (13)$$

Látható, hogy az (5 - 13) összefüggések az egyes térerősségek z tengely menti összetevőire vonatkoznak. Az x és y tengely menti mennyiségek számítása ezzel azonos módon történik. Ez a függelékben szerepel.

3. ADATFOLYAM ÉS KERETRENDSZER KIALAKÍTÁSA

Ezen módszerek ismeretében már végezhető FDTD szimuláció. Ez a munka elsősorban az ehhez szükséges keretrendszer kialakítására fókuszál. Ebben a szakaszban tárgyalásra kerül a szimuláció futtatásához szükséges rácsrendszer felépítésének folyamata és adatmenedzsmentje. Ehhez szimulációs szempontból a Laporte és munkatársai [21] által fejlesztett nyílt forráskódú *fddt* Python könyvtár kerül felhasználásra.

3.1 A felhasznált adatok

Számos 3D modell adatbázis létezik, amely emberi testmodelleket is tartalmaz. Ezeknek egy jelentős része nem ingyenes hozzáférésű, azonban ilyenre is van példa. Ebben a munkában a *Clara.io* [22] a *3D Warehouse* [23] és az *Artec 3D* [24] modelljei kerültek felhasználásra. A *Clara.io* egy webalkalmazás, amellyel többek között 3D objektumokat készíthetnek a felhasználók. Fejlesztője az Exocortex. Az alapszintű funkciók ingyenesen használhatók és a tervek szerint ez nem fog változni. A *3D Warehouse* egy jellegzetes

nyílt forrású elveket valló oldal. Alapvetően SketchUp [25] szoftverben készített épületmodellek közösségi használatára lett kitalálva, de számos más modell is található az oldalon, mint például állatok, növények, vagy éppen emberi modellek. Az *Artec 3D* pedig egy 3D szkennert gyártó. Weboldalán minta gyanánt számos 3D modell elérhető.

Az ezen munka során használt modellek OBJ formátumban [26] kerültek exportálásra. Ezt a Wavefront Technologies [27] fejlesztette ki eredetileg animálható térbeli vizualizációkhoz. Ebben az egyszerűnek mondható formátumban a „v” - vel kezdődő sorokban az első három szám jelenti az adott fájl által definiált felület pontjainak x , y , és z koordinátáit. Ilyen modellekből ebben a „hogyan” kérdésre fókuszáló keretrendszer kialakítását célzó tanulmányban 6 különböző objektum épült be a munkába. Ezek a modellek az általános emberi modell [28], a csontváz modell [29], a máj modell [30], a légzőszervi modell [31], az emésztőszervi modell [32], és a szív modell [33] voltak.

Az említett objektumoknak szükséges még megadni a megfelelő relatív permittivitás és fajlagos vezetőképesség paramétereit ahhoz, szimulációt lehessen futtatni. Erre alkalmas adatforrásnak bizonyult az olasz Országos Kutatási Tanács „Nello Carrara” Alkalmazott Fizika Intézetének adatbázisa [34]. Itt a WiFi-k között népszerűnek mondható 2,4 GHz-es frekvencia lett kiválasztva szimulációs frekvenciának. Az ehhez tartozó adatokat az 1. táblázat tartalmazza. Az emberi modell az izomzat értékeivel volt közelíthető annak nagy részaránya miatt.

1. táblázat

Objektum	$\sigma \left[\frac{1}{\Omega \cdot m} \right]$	$\varepsilon_r [-]$
Emberi modell	1,705	52,791
Csontváz modell	0,385	11,410
Máj modell	1,653	43,118
Légzőszervi modell	0,790	20,510
Emésztőszervi modell	2,167	62,239
Szív modell	2,216	54,918

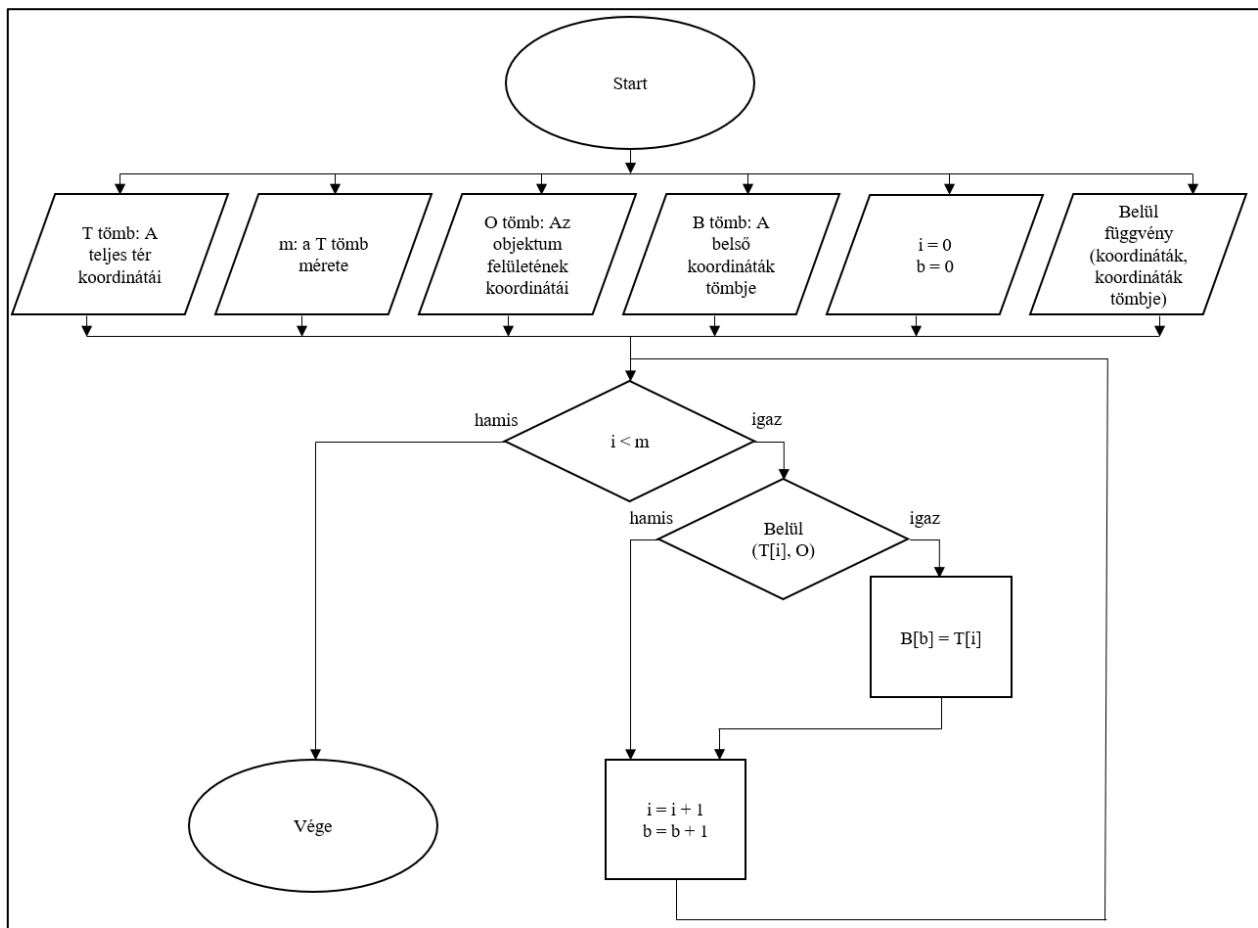
3.2 Az adatok feldolgozása

Ahogy az a 3.1 szakaszban is említésre került, a felhasznált 3D objektum modellek felületek pontjait tartalmazzák. Azonban az FDTD szimulációhoz az is lényeges, hogy az egyes objektumtestek belső pontjai melyek. Tehát a 3.1 szerint vázolt pontfelhőket a skálázáson, diszkrétizáláson és a megfelelő eltolásokon túl „ki kell tölteni”. Ez alól kivétel a csontváz modell, ahol a valóságot jól közelítő módon adottak a pontok.

Ezt a folyamatot a 3. ábrán feltüntetett algoritmus végzi egy objektum esetén. Bemenetei a következők:

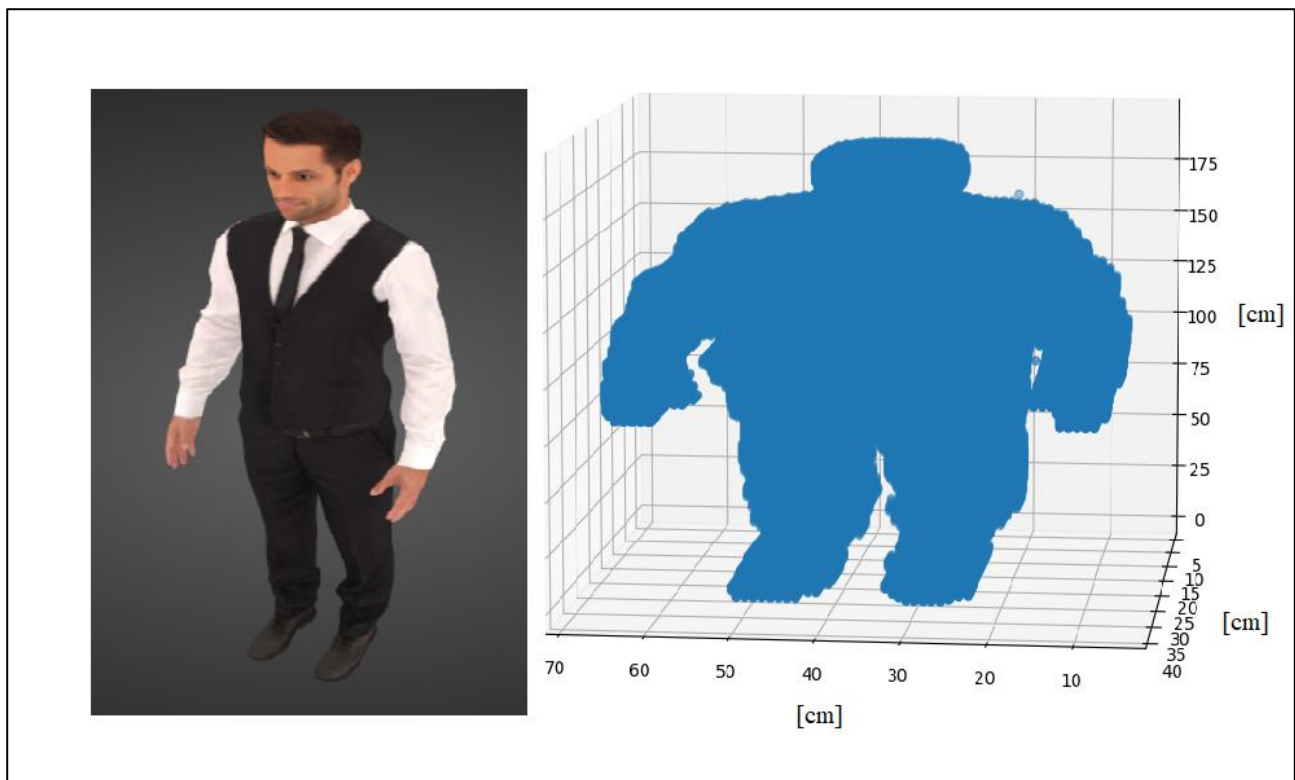
- A modellezett tér összes koordinátája a T tömbben.
- A T tömb mérete, azaz m .
- Az objektum felületének az OBJ formátumból származtatott pontjainak koordinátái az O tömbben.
- Egy B tömb azért, hogy tárolja az objektum belső pontjainak koordinátáit.
- Futóváltozók (i és b) a T és B tömbökhöz.
- Egy függvény, amely eldönti, hogy az adott O tömb által meghatározott felületen belül van-e egy pont.

Az egész folyamat egy ciklussal írható le. Amennyiben az i futóváltozó túllépi a T tömb m méretét, akkor a ciklusnak vége szakad. A ciklusban, ha $T[i]$ és O bemenetekkel a *Belül* függvény igazra értékelődik ki, akkor a B tömbbe bekerül a következő helyre T tömb i -edik eleme. Ezen következő hely megállapításában a b futóváltozó segít, amelyet az i -vel együtt a *Belül* utáni elágazás ágainak lefutása után mindenképpen növelni kell 1-gyel.



3. ábra: Pontfelhők belsejének meghatározási folyamata

Ezek közül a folyamatok közül természetesen a *Belül* függvény lefutása a legérdekesebb. Ez a következők szerint működik. Tulajdonképpen három darab térbeli négyzetes hasáiban vizsgálódik a $T[i]$ pont x , y és z koordinátái szerint. Ezeket a hasábokat úgy jelöli ki, hogy az alapjuk súlypontján áthaladó szimmetriatengelyeik párhuzamosak legyenek az x , y és z tengelyekkel. A hasábok alapja 5-ször 5-ös, így tulajdonképpen ez azt jelenti, hogy az x , y és z koordináták közül mindig az egyiket futtatni kell a teljes vizsgált térben a lehetséges értékeken, míg a másik kettőt egy ezen belüli ciklusban növelni, vagy csökkenteni kell 0-val, 1-gyel vagy 2-vel minden lehetséges, azaz összesen 25 féle, kombinációban. Ha mindegyik térbeli hasáb esetén talál az algoritmus az adott futóváltozó szerinti koordinátánál kisebb és nagyobb értéket is az O tömbben, akkor az adott pont belső pontnak számít. Ezzel a módszerrel az emberi modellből például a 4. ábra szerinti tömör pontfelhő készül.



4. ábra: A keretrendszerben használt emberi modell és tömör pontfelhője

Természetesen ez az algoritmus mindegyik objektumon elvégezhető és így 6 darab tömör pontfelhő kapható. Ezek, valamint a permittivitás és a vezetőképesség segítségével már minden bementi adat megfelelő formátumban áll rendelkezésre az *fdtd* számára.

3.3 Szimuláció Python környezetben

A teljes szimulációhoz alapvetően 4 könyvtár szükséges. A már említett *fdtd* könyvtár minden hivatkozott moduljával, az adatok elmentéséhez lényeges eredendően adatelemzéshez kifejlesztett *pandas* [35] könyvtár, a vizualizációt támogató *matplotlib* [36] könyvtár és a matematikai műveletekhez szükséges *numpy* [37] könyvtár.

A teljes program egyes részletei alapvetően 3 féle csoportba sorolhatók

- I. Vannak olyan részletek, amelyek teljes mértékben új kódként lettek létrehozva.
- II. Vannak olyan részletek is, amelyek az eredeti *fdtd* funkcióit használják, ekőre épülő algoritmusok.
- III. Illetve vannak olyan megoldások is, ahol az eredeti *fdtd* került átírásra.

Ezen III. résszel használható ki igazán a nyílt forráskódúság nagy előnye, miszerint minden funkció és megoldás szabadon elérhető, értelmezhető és szükség esetén lokálisan módosítható. Az I. rész már lényegében tárgyalásra került a 3.2 szakasz kapcsán az adatmanipuláció tekintetében. A II. és III. pontokat a 3.3.1 és a 3.3.2 szakaszok tárgyalják.

3.3.1 Az eredeti *fdtd* funkcióinak használata

A szimuláció lényeges része a hullámhossz, a vákuumbeli fénysebesség és a cellaméret megadása, ugyanis ezek segítségével határozható meg az időlépés nagysága. Az elektromágneses tér frekvenciája 2,4 GHz, így a hullámhossza 0,1249 m, a fénysebesség vákuumban 299 792 458 m/s, a cellaméretet, azaz a modell finomságát pedig célszerű legfeljebb a hullámhossz tizedének választani a stabilitáshoz [3]. Ezt a választást az egyszerű felépíthetőség és az elv biztonságos betartása érdekében úgy tettem meg, hogy a cellaméret 1 cm lett. Ezeknek megfelelően, valamint [21] és [38] alapján az időlépés az alábbiak szerint számítandó:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{\sqrt{3} \cdot c} \quad (14)$$

ahol az eddig nem tárgyalt mennyiségek:

- Δt az időlépés [s] mértékegységben,
- Δs pedig a rács finomsága [cm] mértékegységben.

Ezzel az emberi modell egy 180 cm magas objektum lesz, amely egy szélesség, vastagság, magasság sorrendben értelmezett 72-szer 44-szer 200-as térben kerül elhelyezésre úgy, hogy a vastagság alatt a mellkast a háttal összekötő tengely értendő. Ezzel elérhető, hogy minden irányban 10-10 cm távolságra legyen a szimulációs rács széléhez legközelebbi pontja az emberi testnek a szimulációs rács szélétől. Ez a rács így az *fdtd.Grid* inicializációjaként jön létre. Az *fdtd.PML* paranccsal a rács bizonyos részei tökéletesen illesztett rétegekké alakíthatók [21]. Ez a rács szélénél lévő 5 cm-es rétegben került beállításra.

Az emberi modellnek és szerveinek beállítására egy az *fdtd* funkcióira építő saját függvény íródott. Ez azt teszi, hogy végigfut a 3.1 és 3.2 szakasz szerint leírt adatokon és az 1. táblázat sorrendjében beállítja azokat az *fdtd.Grid* objektumnak. Ezt az *fdtd.AbsorbingObject* osztály inicializálásával tudja megtenni, amely a létrehozásánál paraméterként éppen a relatív permittivitást és a vezetőképességet várja bemenetként.

Végül a futtatás előtt még a forrás beállítása a lényeges. Ezt [3] alapján úgy lehetett megvalósítani, hogy az összes szélesség-vastagság síkkal párhuzamos réteg esetén a síkban a (10, 10) koordinátájú pont közel végtelen relatív permittivitásúra ($\epsilon_r = 10^{19}$) és az alumíniummal megegyező vezetőképességűre ($\sigma = 37\,735\,849\text{ S/m}$) lett választva az *fdtd.AbsorbingObject* segítségével, kivéve a középső, azaz a 100. rétegben. Itt az *fdtd.PointSource* által olyan forrás lett létrehozva, amely ember nélküli háló esetén, a középső (36, 22, 100) pontban 181,26 A/m effektív mágneses térerősség értéket produkál, ami [39] szerint a 2 GHz-es frekvenciáig érvényes képlettel kiszámított érték. Azért ez a közelítés került alkalmazásra mert 2 GHz felett nincs megadva határérték mágneses térerősségre és egyébként is ezen munka fő fókusza a modellezés folyamata. Ez az érték a 16 – 23 periódusok átlagolásából került kiszámításra, ahogy a 3.3.2 szakasz értékei is. Ennek mikéntje ott kerül bemutatásra.

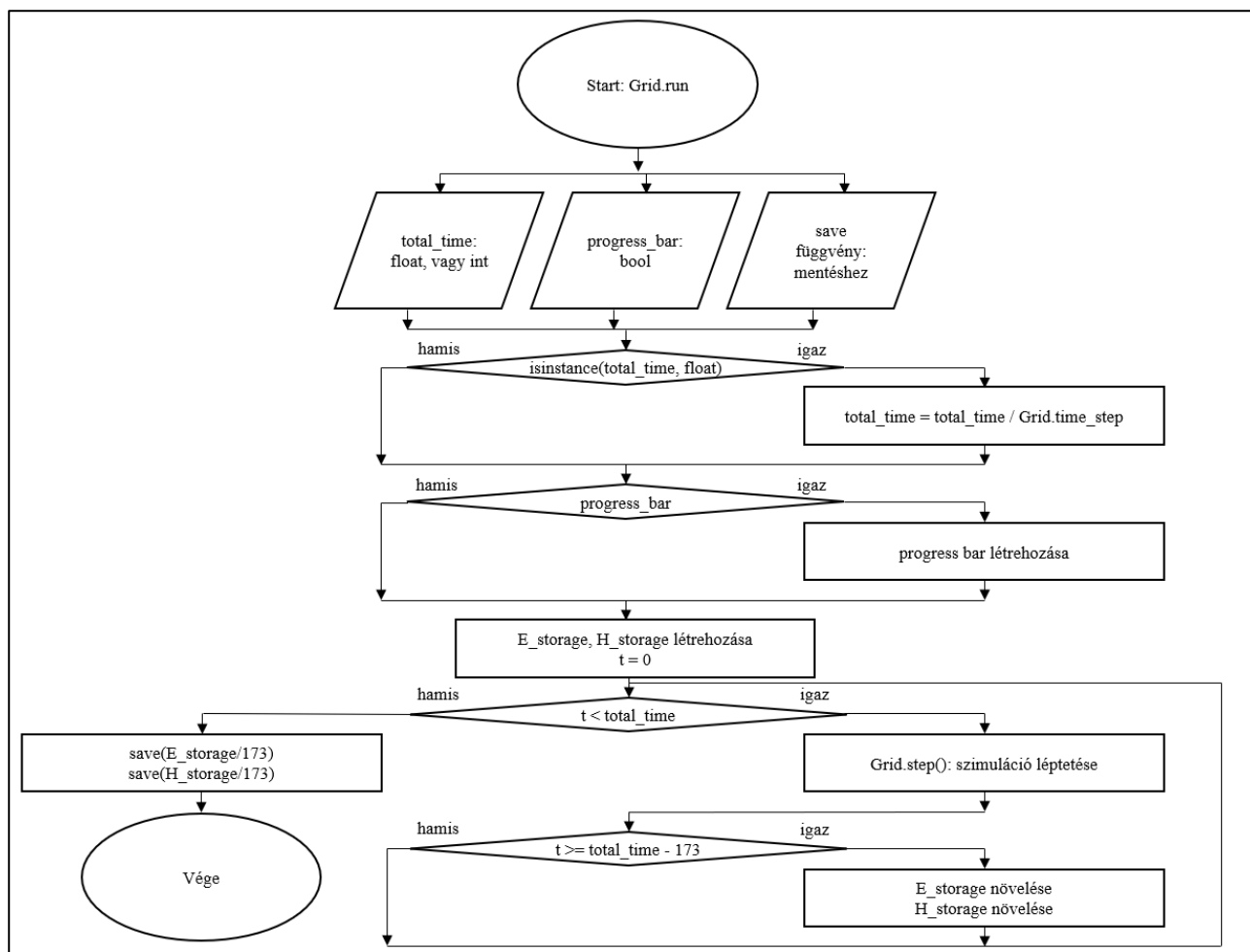
3.3.2 Az eredeti *fdtd* funkcióinak módosított használata

Az eddigieket már csupán a *Grid* osztály *run* függvénye követi és ezzel el is indulhat a futtatás. Ennek bemeneti paramétere a *total_time*, amelynél meg lehet adni, hogy hány időlépés legyen a teljes futás, illetve a *progress_bar* bool változó, amely alapértelmezés szerint *True* értéket vesz fel és ekkor megjelenik a futás százalékos állapota. A 2,4 GHz frekvenciához $4,16 \cdot 10^{-10}$ s periódusidő tartozik. Ennek 8-szorásában pedig a (14) egyenlet alapján számított időlépés 173-szor van meg. Tehát a $16 + 8$ periódus $3 \cdot 173$ időlépésből jön ki, így legalább ennyit kell beállítani a *total_time* változónak.

Az adatok mentése kapcsán használható ki a nyílt forráskódúság nagy előnye. Ugyanis elérhető, hogy ne csupán egy végső pillanatnyi állapotát lehessen menteni a rendszernek, hanem vizsgálni lehessen egy hosszabb időszak effektív értékét. Ezt az *fdtd* könyvtár *grid.py* moduljának módosításával lehet elérni. A *grid.py*-ban a *Grid* osztály *run* függvénye módosítás nélkül csupán a következőket tenné:

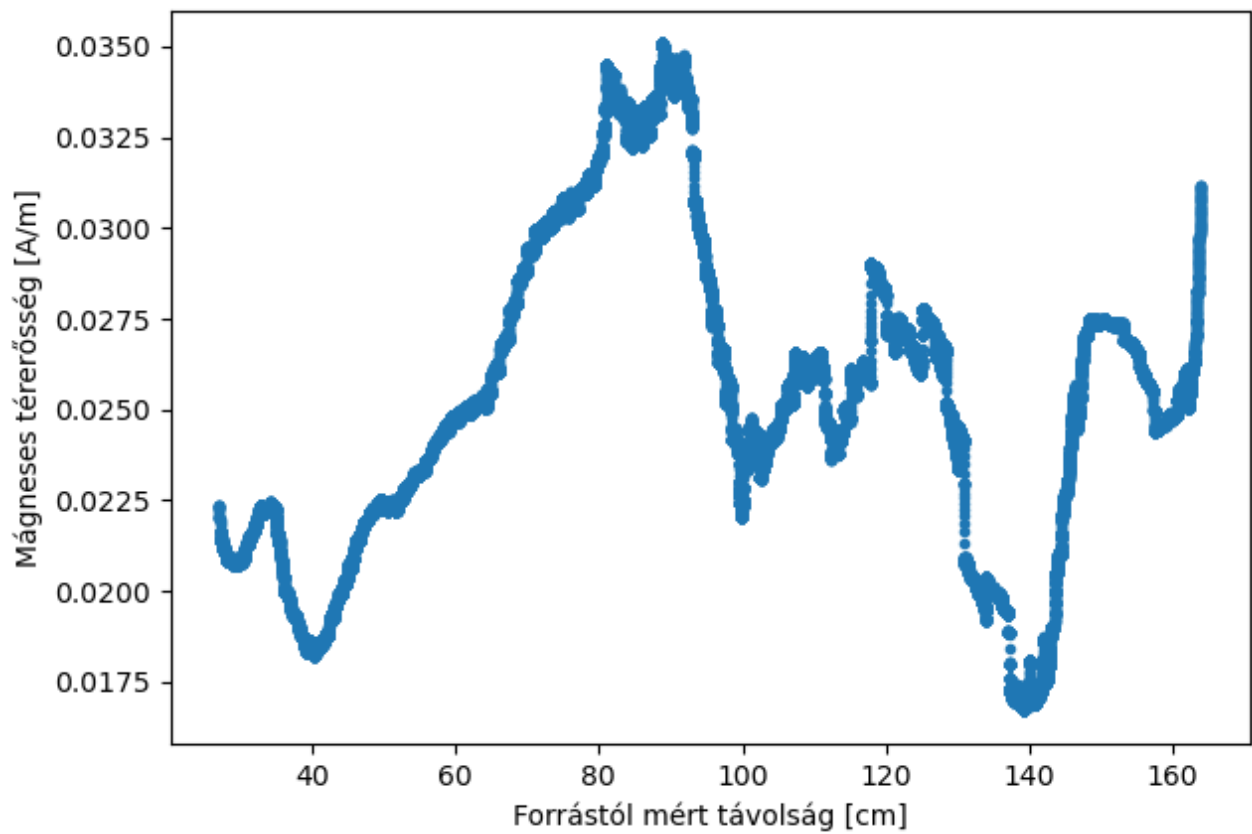
1. Amennyiben a felhasználó *float*-ként adta meg a *total_time*-ot, a *run* a *float*-ot nem időlépésként, hanem szimulációs időként kezelné, és kiszámítaná az időlépés nagyságával való osztással, hogy hány időlépésig fusson a szimuláció.
2. Erre még létrehozna egy *range*-et.
3. Illetve a *progress_bar* *True* értéke esetén létrehozná azt.
4. Végül pedig ebben a *range*-ben elindítaná a futtatást.

A módosított futtatás esetén az első három pont változatlan, azonban a negyedik jelentősen kibővül, változik. Még az utolsó pont előtt célszerű létrehozni egy *H_storage* és egy *E_storage* *numpy* tömböket. Ezek inicializáláskor 72-szer, 44-szer, 200-as *numpy.zeros* függvénnyel létrehozott csupa 0-t tartalmazó tömbök. A cikluson belül pedig, ha az adott iterációban az utolsó 173 időlépésben jár a kód, akkor az osztály *H* és *E* attribútumai által tárolt térerősség értékek négyzetösszegeinek gyökeit hozzáadja a *H_storage*, illetve az *E_storage* tömbökhöz. Végül az utolsó iteráció után pedig elmenti e két tömb 173-ad részét. A teljes folyamat az 5. ábrán figyelhető meg.

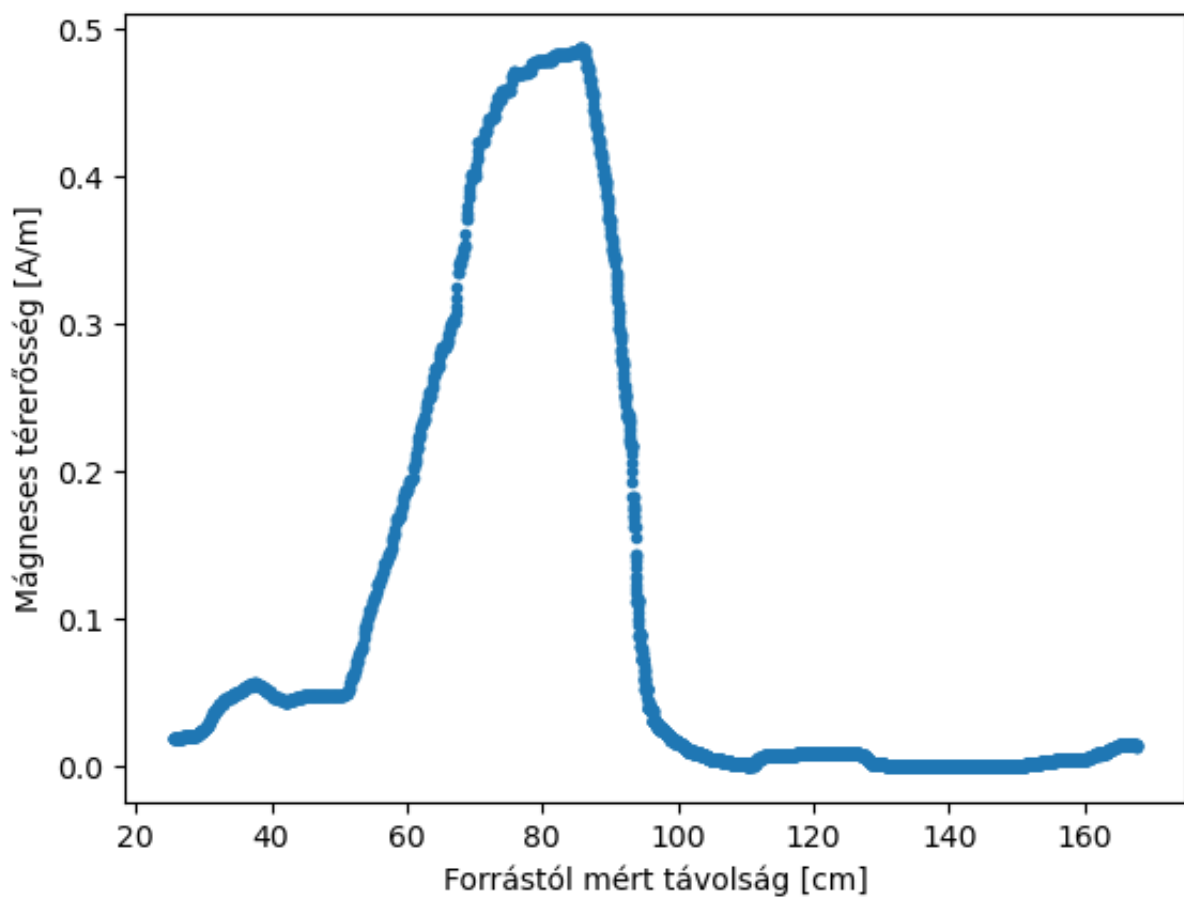


5. ábra: A futtatás módosított függvényének működése

Ebből a folyamatból egyedül a save függvény leírása az, ami még nem került említésre. Ez egy *try – except* - tel megpróbálja létrehozni az adott *time_step*-ről elnevezett mappát, de ha az létezik, akkor nem írja felül. 0-tól 44-ig futtat egy ciklust, ahol minden szélesség - magasság rétegét elmenti az átadott tömbnek. Ez a mentés a *pandas.DataFrame.to_excel* paranccsal történik a tömbök *DataFrame*-mé alakítása után. Végül az ábrázolás is itt történhet meg. A *matplotlib scatter* függvénye segítségével például ábrázolhatók a mágneses térerősség értékek az emberi testre és a csontozatra. A 6. és 7. ábra ezeket jeleníti meg a forrástól való távolság függvényében. A zaj szűrésének érdekében az ábrázolásnál a teljes adatmennyiség 10%-ának megfelelő számmal, mozgóátlag számítással történt az ábrázolás. Megfigyelhető, hogy az emberi testen belül jóval kisebb lesz a mágneses térerősség értéke, mint anélkül lenne a rácsrendszerben. Egy ilyen számításra képes keretrendszer rendelkezésre állása esetén a szakértők már levonhatják a megfelelő következtetéseket.



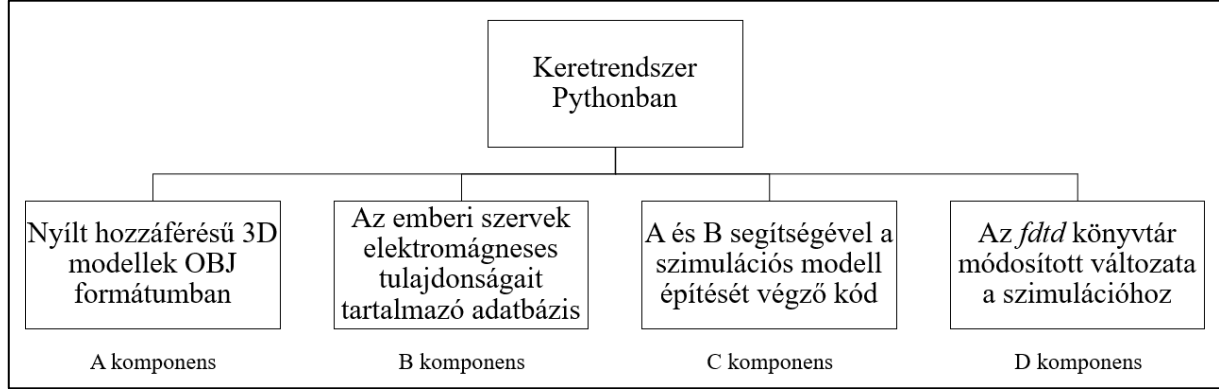
6. ábra: Az izomzatban megjelenő mágneses térerősség a forrástól mért távolság függvényében



7. ábra: Az csontokban megjelenő mágneses térerősség a forrástól mért távolság függvényében

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben áttekintésre került az FDTD szimulációnak számos alkalmazási példája és a szimuláció alapjai. Ezekből az alapokból, azaz Faraday- és Ampère-törvényből kiindulva konkrét háromdimenziós számítási módszer került leírásra a megfelelő numerikus számításokhoz lényeges szimulációs mértékegységekben. A szimuláció elvégzéséhez szükséges adatmenedzsment hangsúlyos szerepet kapott jelen munkában. Részletesen kifejtésre került a felhasznált nyílt hozzáférésű 3D modellek és az elektromágnesesség szempontjából jellemző paraméterek adatfeldolgozása. Az ezen adatokból és folyamatokból felépülő keretrendszert a 8. ábra szemlélteti.



8. ábra: Keretrendszer struktúrája

A teljes keretrendszer Pythonban van összefogva és alapvetően négy komponensből épül fel. A két fő bemeneti komponens a 3D modelleket tartalmazó (A) és az azok villamos paramétereit tartalmazó (B) komponens. Ezek egy harmadik (C) komponens segítségével épülnek szimulációs modellé. A szimulációt pedig a negyedik (D) komponens végzi.

FÜGGELÉK

Az F1 függelék a 2.2.2 fejezet szerinti x-tengely menti mennyiségekre, a F2 függelék pedig az y-tengely menti mennyiségekre vonatkozik.

F1 Az FDTD szimuláció x-tengely menti mennyiségeinek számítása

$${}_x E_s^{\Delta,d} = \frac{1}{c \cdot \epsilon_r} {}_x H_s^{rot,d} - \frac{\sigma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} {}_x E_s^{avg,d} \quad (15)$$

$${}_x E_s^{\Delta,d} = \frac{{}_x E_s^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k+\frac{1}{2}) - {}_x E_s^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k+\frac{1}{2})}{\Delta t} \quad (16)$$

$${}_x H_s^{rot,d} = \frac{{}_z H_s(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}) - {}_z H_s(i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}) - {}_y H_s(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}) + {}_y H_s(i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2})}{\Delta x} \quad (17)$$

$${}_x E_s^{avg,d} = \frac{{}_x E_s^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k+\frac{1}{2}) + {}_x E_s^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k+\frac{1}{2})}{2} \quad (18)$$

$${}_x H_s^{\Delta,d} = \frac{1}{c} {}_x E_s^{rot,d} \quad (19)$$

$${}^nH_s^{\Delta,d} = \frac{{}^{n+1}H_s\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right) - {}^nH_s\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right)}{\Delta t} \quad (20)$$

$${}^nE_s^{rot,d} = \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}E_s\left(i+\frac{1}{2},j+1,k\right) - {}^{n+\frac{1}{2}}E_s\left(i+\frac{1}{2},j,k\right) - {}^{n+\frac{1}{2}}E_s\left(i+1,j+\frac{1}{2},k\right) + {}^{n+\frac{1}{2}}E_s\left(i,j+\frac{1}{2},k\right)}{\Delta x} \quad (21)$$

F2 Az FDTD szimuláció y-tengely menti mennyiségeinek számítása

$${}^nE_s^{\Delta,d} = \frac{1}{c \cdot \varepsilon_r} {}^nH_s^{rot,d} - \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} {}^nE_s^{avg,d} \quad (22)$$

$${}^nE_s^{\Delta,d} = \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}E_s\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right) - {}^{n-\frac{1}{2}}E_s\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta t} \quad (23)$$

$${}^nH_s^{rot,d} = \frac{{}^nH_s\left(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right) - {}^nH_s\left(i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right) - {}^nH_s\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right) + {}^nH_s\left(i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \quad (24)$$

$${}^nE_s^{avg,d} = \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}E_s\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right) + {}^{n-\frac{1}{2}}E_s\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right)}{2} \quad (25)$$

$${}^nH_s^{\Delta,d} = \frac{1}{c} {}^nE_s^{rot,d} \quad (26)$$

$${}^nH_s^{\Delta,d} = \frac{{}^{n+1}H_s\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right) - {}^nH_s\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right)}{\Delta t} \quad (27)$$

$${}^nE_s^{rot,d} = \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}E_s\left(i+\frac{1}{2},j+1,k\right) - {}^{n+\frac{1}{2}}E_s\left(i+\frac{1}{2},j,k\right) - {}^{n+\frac{1}{2}}E_s\left(i+1,j+\frac{1}{2},k\right) + {}^{n+\frac{1}{2}}E_s\left(i,j+\frac{1}{2},k\right)}{\Delta y} \quad (28)$$

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

A linkek utolsó elérése: 2022. 06. 07.

- [1] J.-M. Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2015.
- [2] W. C. Gibson, The Method of Moments in Electromagnetics, CRC Press, New York, 2022.
- [3] J. E. Houle, D. M. Sullivan, Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method with Python, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2020.
- [4] K. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, IEEE, 1966, vol. 14, no. 3, pp. 302-307.
- [5] A. Taflove, Application of the Finite-Difference Time-Domain Method to Sinusoidal Steady-State Electromagnetic-Penetration Problems, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 1980, vol. EMC-22, no. 3, pp. 191-202.

- [6] E. L. Tan, Fundamental Implicit FDTD Schemes for Computational Electromagnetics and Educational Mobile APPS (Invited Review), Progress in Electromagnetics Research, The Electromagnetics Academy, 2020, vol. 168., pp. 39-59.
- [7] F. L. Teixeira, FDTD/FETD Methods: A Review on Some Recent Advances and Selected Applications, Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Brazilian Microwave and Optoelectronics Society, 2007, vol. 6, no. 1, pp. 83–95.
- [8] T. Tanaka, Y. Baba, Y. Tsujimoto, N. Tsukamoto, FDTD Electromagnetic and Thermal Simulation of a Metal Oxide Varistor Element Considering the Temperature Dependence of Its Resistivity, Electricity, MDPI, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 158-167.
- [9] L. Cao, S. Hao, Y. Zhao, and C. Wang, High-Power Electromagnetic Pulse Effect Prediction for Vehicles Based on Convolutional Neural Network, Electronics, MDPI, 2022, vol. 11, no. 9.
- [10] S. Mohammadi, H. Karami, M. Azadifar, F. Rachidi. On the Efficiency of OpenACC-aided GPU-Based FDTD Approach: Application to Lightning Electromagnetic Fields, Applied Sciences, MDPI, 2020, vol. 10, no. 7.
- [11] A. Choroszucho, J. M. Stankiewicz, Using FDTD method to the analysis of electric field intensity inside complex building constructions, Electrical Engineering, Poznan University of Technology Academic Journals, 2019, no. 97, pp. 39–48.
- [12] T. Akiyoshi, R. Farhad, R. Marcos, A Technique for Calculating Voltages Induced on Twisted-Wire Pairs Using the FDTD Method, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 2017, vol. 59, no. 1, pp. 301-304.
- [13] D. Yan, L. Sun, Y. Sun and B. Jiang, The FDTD Analysis of EMI in Motor Drive System, 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, IEEE, 2006, pp. 8074-8078.
- [14] L. Zhang, Y. Du, D. Wu, FDTD simulation of magnetic heat induction on human body subject, 2015 31st International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, IEEE, 2015, pp. 1-2.
- [15] J. Park, J.-W. Baek, K.-Y. Jung, Accurate and Numerically Stable FDTD Modeling of Human Skin Tissues in THz Band, IEEE Access, IEEE, 2022, vol. 10, pp. 41260 – 41266.
- [16] J.-W. Baek, D.-K. Kim, K.-Y. Jung, Finite-Difference Time-Domain Modeling for Electromagnetic Wave Analysis of Human Voxel Model at Millimeter-Wave Frequencies, IEEE Access, IEEE, 2018, vol. 7, pp. 3635 – 3643.
- [17] K. Masumnia-Bisheh, K. Forooghi, M. Ghaffari-Miab, C. M. Furse, Geometrically Stochastic FDTD Method for Uncertainty Quantification of EM Fields and SAR in Biological Tissues, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, IEEE, 2019, vol. 67, pp. 7466-7475.
- [18] K. Y. Elwasife, S. A. Abuishaiba, M. M. Shabat, 3D-FDTD Head Model Exposure to Electromagnetic Cellular Phones Radiation, American Journal of Electromagnetics and Applications, Science Publishing Group, 2018, vol. 6, no. 2.
- [19] I. Karatsi, S. Bakogianni, S. Koulouridis, SAR and thermal distribution of pregnant woman and child inside elevator cabin, International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Cambridge University Press, 2022, pp. 1-14.
- [20] A. Taflove, S. C. Hagness, M. Picket-May, Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, 2004, pp. 629-669.
- [21] F. Laporte, fdtd, <https://github.com/flaport/fdtd>
- [22] Clara.io, <https://clara.io>
- [23] 3D Warehouse, <https://3dwarehouse.sketchup.com>
- [24] Artec 3D, <https://www.artec3d.com>
- [25] SketchUp, <https://www.sketchup.com>
- [26] OBJ, <https://www.iana.org/assignments/media-types/model/obj>
- [27] Wavefront Technologies, <http://www.wft.bz>
- [28] Emberi modell: Meet Bob, <https://clara.io/view/2975f7e6-a8a6-4f3a-8f41-22a2e5ace461>

- [29] Csontváz modell: Skeleton, <https://clara.io/view/70265cfc-7acf-4e6d-9f3d-00a36940463c>
- [30] Máj modell: liver, human, <https://3dwarehouse.sketchup.com/model/f8cb441d-798c-4200-97e2-a15f56e7a172/liver-human?login=true>
- [31] Légzőszervi modell: Lungs, <https://clara.io/view/7e37e396-e925-44f9-b09a-1b11703bdaca>
- [32] Emésztőszervi modell: Guts, <https://3dwarehouse.sketchup.com/model/49751fd293a0770be4b68d3b17c43658/Guts>
- [33] Szív modell: Bovine heart, <https://www.artec3d.com/3d-models/bovine-heart>
- [34] “Nello Carrara” Institute of Applied Physics: Calculation of the Dielectric Properties of Body Tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz, <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php>
- [35] The pandas development team, pandas-dev/pandas: Pandas, Zenodo, 2020, 10.5281/zenodo.3509134
- [36] J. D. Hunter, Matplotlib: A 2D Graphics Environment, Computing in Science & Engineering, IEEE, 2007, vol. 9, no. 3, pp. 90-95.
- [37] C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt, R. Gommers, P. Virtanen, D. Cournapeau, E. Wieser, J. Taylor, S. Berg, N. J. Smith, R. Kern, M. Picus, S. Hoyer, M. H. van Kerkwijk, M. Brett, A. Haldane, J. F. del Río, M. Wiebe, P. Peterson, P. Gérard-Marchant, K. Sheppard, T. Reddy, W. Weckesser, H. Abbasi, C. Gohlke, T. E. Oliphant, Array programming with NumPy, Nature, Springer Science and Business Media, 2020, vol. 585, pp. 357-362.
- [38] R. Courant, K. O. Friedrichs, H. Lewy, Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik, Mathematische Annalen, 1928, vol. 100. pp. 32-74.
- [39] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz), Health Phys., 2020, vol. 118. pp. 483–524.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem docensének, **Dr. Tamus Zoltán Ádámnak**, hogy a Villamosság élettani hatásai című tárgy keretein belül támogatta ezt a munkát.