

A végeselemes modellezéstől a szimuláció tudományáig: A numerikus szimulációban rejlő lehetőségek kiaknázása

From Finite Element Modeling to Simulation Science:
Unlocking the Power of Numerical Simulation

Bármilyen hihetetlenül is hangzik, a hagyományos végeselemes szoftverekben alkalmazott magtechnológia és a mögöttes architektúra már csaknem 60 éves. Ennek következtében számos, azóta született fontos tudományos eredmény nem érhető el az ezeket az eszközöket használó mérnökök számára.

Különbséget kell tennünk a végeselemes modellezés gyakorlata és a végeselem analízis tudománya között. Ezek lényegében két egymástól független evolúciós folyamat eredménye. A végeselemes modellezés gyakorlata az 1960-as években gyökerezik, amely időszak a végeselem-módszer fejlődésének korai, paradigma előtti szakaszára esik. Ez a Thomas Kuhn által meghatározott szakasz egy olyan időszakot jelöl, amikor egy adott tudományos kutatási terület még nem rendelkezik egységes elméleti kerettel [1].

A végeselem-módszer egységes elméleti keretének kidolgozására később került sor, és csak az 1980-as évek végére ért el magas szintű érettséget. Ez a keretrendszer elsősorban a matematikusi közösségen belül alakult ki, ahol a végeselem-módszerre úgy tekintettek, mint egy numerikus technikára, amely a jól megfogalmazott matematikai problémák pontos megoldásainak közelítésére szolgál. Ezzel szemben a mérnöki közösség – beleértve a kereskedelmi végeselem programok fejlesztőit is – a módszert egy intuitív modellezési eszköznek tekintette, lényegében a szerkezetanalízis mátrixmódszereinek kiterjesztéseként kezelte [2].

Ez a két eltérő szemléletmód az egyik fő oka annak, hogy a numerikus szimulációban rejlő lehetőségek a gyakorlatban még mindig jelentős részben kihasználatlanok maradnak. A kiaknázatlan potenciál a végeselemes modellezés mérnöki gyakorlata és a numerikus szimuláció tudományos alapjai közötti szakadékból ered. E lehetőségek hasznosításához át kell hidalni ezt a szakadékot, ami több alapvető akadály leküzdését teszi szükségessé.

Vegyes teljesítmény

Mire a végeselem-módszer elméleti alapjait kidolgozták, a hagyományos kereskedelmi szoftverek már mélyen beágyazódtak a mérnöki munkafolyamatokba. Az elmúlt ötven év során a gyakorló szakemberek jelentős tapasztalatot halmoztak fel ezekkel az eszközökkel. Az eredmények azonban vegyesek.

Ezeket a kódokat hatékonyan alkalmazták olyan szerkezetanalízis-problémákra, mint a repülőgépvázak terhelés-modellezése és a gépjárművek ütközésdinamikája. Ilyen esetekben a kívánt értékeket a terhelés-elmozdulás összefüggése határozza meg. Ez a cél végeselemes modellek szakszerű beállításával és a beviteli adatok körültekintő megválasztásával elérhető.

A szilárdságtani elemzések ezzel szemben jóval szigorúbb követelményeket támasztanak. A releváns eredmény-mennyiségek a feszültségmezőtől és más, az elmozdulásmező deriváltjaiból származó mennyiségektől függenek. Következésképpen a megbízható feszültségbecslés az elmozdulásmező nagyobb pontosságú reprezentációját és a modellezési részletek körültekintőbb meghatározását teszi szükségessé. Ez magában foglalja többek között a koncentrált erők, a pontszerű peremfeltételek és a redukált integrálású elemek kerülését.

A több évtizedes használat ellenére a hagyományos vége-selemes kódok nem képesek döntési szintű megbízhatóságot nyújtani a szilárdsági előrejel-zések terén. Frank Kendall, az Egyesült Államok védelmi minisz-teriumának ügyvezető államtitká-
 Frank Kendall III
ra (később a légierő minisztere), az F-35 vadászgép fejlesztési program jelentős csúszásainak és költségütlépéseinek elsődle-ges okát magyarázva elmondta: „A minisztérium optimista előrejelzéseket fogalmazott meg az F-35 gyártásának megkezdésekor, miszerint már elég jó tervezőeszközök-
kel, szimulációkkal és modellezéssel rendelkezünk ahhoz, hogy ne kelljen aggódnunk a tesztek során felmerülő problémák miatt. Ez tévedés volt, és most megfizetjük az árát.” [3]. [Zárójelben: Amikor egy ilyen magas rangú tiszt-viselő tévedést említ, a tévedés ára ritkán esik 100 milliárd dollár alá.]



F-35: Ötödik generációs, többfeladatú lopakodó vadászgép

Ezek az „optimista előrejelzések” azon a feltételezésen alapultak, hogy a hagyományos vége-selemes eszközök-nek – amelyek az F-35 program kezdetekor már több mint harminc éve fejlesztés alatt álltak – bőséges idejük volt arra, hogy megbízható tervezési eszközökké váljanak. Bár a felhasználói felületek és a számítási sebesség jelentősen

fejlődtek ebben az időszakban, a mögöttes, elem-orientált szoftverarchitektúra, amely a végeselem-módszer 1960-as évekbeli értelmezésében gyökerezik, nem rendelkezik azzal a rugalmassággal, hogy befogadja a későbbi eredetű fontos elméleti és algoritmusbeli fejlesztéseket, amelyek közvetlenül befolyásolják a szilárdságtani előrejelzések megbízhatóságát.

A stagnálás gyökerei

Hogyan lehetséges, hogy a széles körben alkalmazott mérnöki szoftverrendszerek számos tekintetben még mindig nem tükrözik a numerikus szimuláció tudományának jelenlegi állását? A válasz részben a fejlesztést és alkalmazást meghatározó irányítási (governance) mechanizmusok hiányosságaiban keresendő. Ennek megértéséhez egyaránt figyelembe kell vennünk a fejlesztők és a felhasználók nézőpontját.

Nyilvánvaló, hogy a szoftverfejlesztők szakmai felelőssége a lehető legfejlettebb és tudományosan megalapozott technológiák elérhetővé tétele. A hagyományos végeselemes szoftverek alapjai nagyrészt a végeselem-módszer 1960-as és 1970-es évekre kialakult eredményeire épültek. A fejlesztők sok esetben nem hasznosították az alkalmazott matematikai kutatások későbbi, jelentős eredményeit, részben azért, mert ezek az eredmények az alkalmazott matematika formális nyelvén kerültek megfogalmazásra, amely a legtöbb mérnök számára nehezen hozzáférhető. Még nehezebben áthidalható problémát jelentett, hogy a hagyományos végeselemes programrendszerek szoftverarchitektúráját nem úgy tervezték, hogy képes legyen befogadni a későbbi módszertani fejlesztéseket. A mérnöki munkafolyamatokba mélyen beágyazódott rendszerek teljes újraírását ezért végül sokan gyakorlatilag megvalósíthatatlan feladatnak tekintették.

A probléma fennmaradása nagyrészt annak tulajdonítható, hogy a szabályozó hatóságok, a kormányzati beszerzési szakemberek és az ipari felhasználók többnyire kritikai vizsgálat nélkül fogadták el a kereskedelmi forgalomban elérhető megoldásokat, és feltételezték, hogy azok megfelelő alapot nyújtanak a kulcsfontosságú tervezési döntések meghozatalához. Frank Kendall megjegyzéseit ebben az összefüggésben kell értelmezni. Az általa említett utólagos bölcsesség ellenére azonban az elmúlt tizennégy évben nem következett be érdemi változás. Nehéz mindezt másként értelmezni, mint egy széles körben elterjedt, rendszerszintű mulasztás következményeként.

Útmutató a fejlődéshez

A numerikus szimuláció megbízhatósága, és ezzel együtt gyakorlati hasznossága jelentősen növekedhet, ha a végeselemes elemzés tudományos eredményeit integráló szoftvereszközök széles körben hozzáférhetővé válnak a mérnöki közösség számára.

Ez hatalmas vállalkozás, amely megköveteli a numerikus szimuláció jelenlegi, elemközpontú szemléletéről egy modellközpontú megközelítésre való áttérést, valamint olyan szoftverarchitektúra kialakítását, amely támogatja a

hierarchikus végeselemes függvényterek alkalmazását és a modellek hierarchikus, formális kiterjesztését [4]. Ezek a képességek a verifikáció és validáció (V&V) elengedhetetlen előfeltételei. Hiányoznak a hagyományos végeselemes szoftverekből, ugyanakkor nélkülözhetetlenek a numerikus szimuláció és a magyarázható mesterséges intelligencia (XAI) integrációjához. Az alábbiakban bemutatjuk a cél eléréséhez vezető gyakorlati lépéseket [5].

- Ismerjük fel a hagyományos végeselemes szoftverek korlátait, és tekintsünk rájuk elsősorban szerkezeti modellezési eszközként. Ez nem jelenti azt, hogy szilárdságtani problémák megoldására ne lennének alkalmazhatók; ehhez azonban speciális szakértelem szükséges a megfelelő elemtípusok, modellezési eljárások és bemeneti adatok kiválasztásához. A vizsgált eredménymennyiségek hibájának becslése általában összetett, költséges és időigényes feladat, ezért az ipari gyakorlatban erre csak ritkán kerül sor.
- A megbízható prediktív teljesítményben érdekelt szereplőknek, így a felügyeleti hatóságoknak, a kormányzati beszerzési szakembereknek és a gyártó vállalatoknak szabványokat kellene kidolgozniuk a numerikus szimulációk által szolgáltatott információk elfogadhatóságának megítélésére. E szabványoknak meg kell követelniük, hogy a szimulációk a tervezési és üzemeltetési döntésekhez közvetlenül felhasználható, bizonyítékokkal alátámasztott eredményeket szolgáltatassanak. Fontos hangsúlyozni, hogy az ASME V&V 40 és a NASA-STD-7009B szabványoknak való megfelelés önmagában nem elegendő az ilyen szintű megbízhatóság igazolásához. Ezek a szabványok elsősorban a modellezési és hitelesítési folyamatok megfelelőségére összpontosítanak, és nem garantálják, hogy egy adott alkalmazásban a modell előrejelzései a kívánt pontossággal és megbízhatósággal tükrözik a valóságot.
- A numerikus szimulációk által szolgáltatott információkra támaszkodó szervezeteknek hatékony szimuláció-irányítási (simulation governance) gyakorlatot kell kialakítaniuk, amelynek célja annak biztosítása, hogy az előrejelzett mennyiségek megbízhatósága a fizikai kísérletek eredményeihez mérhető legyen. Ez egyben hozzájárul a numerikus szimulációs projektek hatékonyságának és értékteremtő képességének maximalizálásához is [6].

Kulcsfontosságú tanulságok

- A végeselemes modellezés azt kérdezi: „Milyen hálót és milyen elemeket használjak?” A szimuláció tudománya ezzel szemben azt kérdezi: „Mennyire megbízható az előrejelzés, és tudjuk-e ennek megbízhatóságát igazolni?”
- A numerikus szimuláció valódi értéke nem pusztán az eredmények előállításában, hanem azok megalapozottságának igazolásában rejlik.
- A numerikus szimulációban rendkívül nagy kiaknázatlan lehetőség rejlik.
- A végeselem-módszer matematikai alapjai és számos

jelentős továbbfejlesztése évtizedek óta ismertek. A hagyományos végeselemes szoftverek azonban ezeket az eredményeket nem tették hozzáférhetővé a mérnöki gyakorlat számára. Ennek következtében a gyakorlati alkalmazás számos fontos területen elmaradt a tudomány jelenlegi állásától. A hagyományos eszközök továbbra is hatékonyan használhatók szerkezeti modellezési feladatokra, szilárdságtani előrejelzések esetén azonban általában nem nyújtanak a döntéshozatalhoz szükséges megbízhatóságot.

- Ahhoz, hogy a szimulációk megbízható előrejelzéseket szolgáltatassanak, fel kell hagynunk azzal a szemlélettel, amely a modellezést elsősorban intuitív mérnöki feladatnak tekinti. Ehelyett a numerikus szimulációt tudományosan megalapozott folyamatként kell kezelnünk, amely megköveteli a hibabecslést, a verifikációt, valamint annak igazolását, hogy az előrejelzett mennyiségek megfelelnek a döntéshozatalhoz szükséges megbízhatósági követelményeknek. E szemléletváltás nélkül a szimuláció továbbra is bizonyítékokkal nem alátámasztott eredményeket szolgáltat, amelyek megbízhatósága szükségszerűen kérdéses marad.

Hivatkozások

- [1] Kuhn, T. S. (2000). A tudományos forradalmak szerkezete. Budapest: Osiris Kiadó.
- [2] Przemieniecki, J. S. (Principal Editor) Matrix Methods in Structural Mechanics: Proceedings of the Conference Held at Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 26–28 October 1965, AFFDL-TR-66-80.
- [3] Kendall, F. The Acquisition Implications of the DOD Strategic Guidance and the FY 2013 Budget. Center for Strategic and International Studies, Washington, DC, February 6, 2012. Transcript: tinyurl.com
- [4] Szabó, B. and Babuška, I. (2021). Finite Element Analysis. Method, Verification and Validation. John Wiley & Sons Inc. Hoboken, NJ.
- [5] Szabó, B. (2026). From Legacy Finite Element Modeling to Explainable Simulation: Technical Requirements for XAI in Computational Mechanics. engrXiv. engrxiv.org
- [6] Szabó, B. and Actis, R. (2012). Simulation governance: Technical requirements for mechanical design. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 249, pp. 158-168.

Szabó Barna

*Engineering Software Research and Development, Inc.
St. Louis, Missouri, USA*

ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA ELŐFIZETÉS MEGÚJÍTÁSA

Ne felejtse el megújítani

előfizetését

az Anyagvizsgálók Lapjára!

A lap újjászerveződött csapatának köszönhetően az első
nyomtatott verzió **2022-től** elérhető.

A **nyomtatott kiadvány negyedévente** – teljesen megegyező
tartalommal, mint az online letölthető számok – **előfizetéses**
formában jelenik meg.

Amennyiben igényt tartana rá, kérem jelezze
a MAROVISZ felé az alábbi email címen:

marovisz@marovisz.hu