

Digitális ikrek Digital Twins

A digitális ikrek első alkalmazása az 1960-as években történt, amikor az Apollo űrhajó program „élő modellje” néven volt ismeretes. Amikor az Apollo 13 fedélzetén egy oxigénpalack felrobbant, a NASA¹ többféle szimulátort használt, és az űrhajó fizikai modelljét digitális szimulációkkal egészítette ki. Ezzel létrejött egy digitális iker, amelyet a balesethez vezető események elemzésére és megoldást kereső javaslatok kidolgozására használtak. A „digitális iker” kifejezést John Vickers, a NASA egyik mérnöke, jóval később javasolta. Míg a kifejezést általában fizikai objektumok modellezésével társítják, szervezeti folyamatok ábrázolására is használatos. A következőben csak fizikai objektumok digitális ikreivel foglalkozunk.

Egy 2021-ben megtartott vitaindító előadásban a digitális ikrek gondolatának jelenlegi felfogásáról a NASA áttekintése olvasható [1]. Ez az előadás a következő idézetet tartalmazza a 2. számú hivatkozásból:

„A digitális iker olyan virtuális információs konstrukciók összessége, amely teljes mértékben leír egy tervezett vagy tényleges fizikai objektumot a mikro/atomi szinttől a makro/geometriai szintig. Optimális esetben minden olyan információ, amelyet egy fizikai objektum tesztelése során megszerezhetünk, ugyancsak megszerezhető a digitális ikerből.”

Úgy gondolom, hogy ez a megfogalmazás közelebb áll egy túlságosan ambiciózus célkitűzéshez, mint a digitális ikrek funkcionális meghatározásához. Pozitívum az az elvárás, hogy a szimuláció eredményeinek megbízhatósága összevethető kell legyen egy fizikai kísérlet adatainak megbízhatóságával. Megjegyzendő, hogy ez csak akkor lehetséges, ha a matematikai modelleket a kalibrációs tartományukon belül használjuk [3]. Negatívum, hogy bármely fizikai objektum leírása „a mikro/atomi szinttől a makro/geometriai szintig” nem szükséges és nem is kivitelezhető. A szimulációs projekt célja nem egy fizikai rendszer leírása A-tól Z-ig, hanem a kívánt értékek előrejelzése, mint például a várható kifáradási élettartam, biztonsági határok, határterhelés, deformáció, sajátfrekvencia és hasonlók. Ennek fényében a következő meghatározást javaslom:

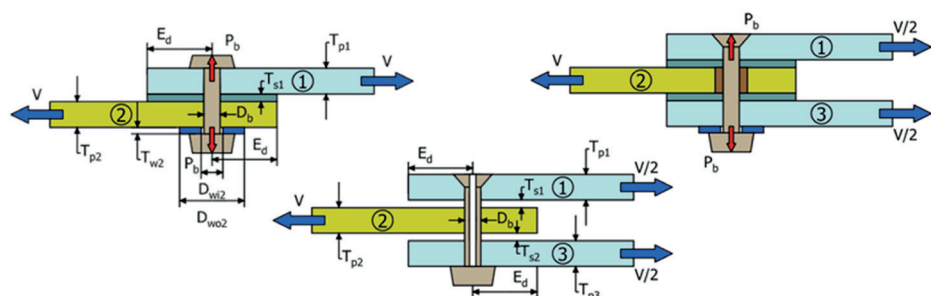
„A digitális iker olyan matematikai modellek halmaza, amelyek egy tervezett vagy meglévő fizikai objektum működését jellemző értékek előrejelzésére szolgálnak. Amikor a matematikai modelleket a kalibrációs tartományukon belül használjuk, az előrejelzések megbízhatósága összehasonlítható egy fizikai kísérlet megbízhatóságával.”

A matematikai modellek halmaza tartalmazhatja egy komponens egyetlen modelljét vagy több, egymással kölcsönhatásban lévő komponens modelljét. A digitális ikrek létrehozásának motivációja jellemzően az objektum életciklus menedzsmentjének követelményeiből fakad: nagy értékű objektumokat a teljes életciklusuk során figyelik, és a digitális ikerpárt alkotó modelleket új adatokkal frissítik, amikor azok elérhetővé válnak. Ez a modellfejlesztési projektek általános keretébe tartozik, amelynek részletei megtalálhatók a „*Modellfejlesztés a mérnöki tudományokban*”² című blogban, részletesebben a 3. számú hivatkozásban. A kalibrációs tartomány minden matematikai modell meghatározó tulajdonsága.

Példa: Komponens iker

Az SFAT as Single Fastener Analysis Tool (egyetlen rögzítőelemet elemző eszköz) rövidése. SFAT a fejlett intelligens alkalmazások családjába sorolható, amely fém vagy rétegelt (laminált) lemezek egyszeres és kettős nyírási csatlakozásainak átfogó elemzésére szolgál. Ugyancsak jó példa a komponens ikrekre, és rávilágít a digitális ikrek fejlesztésével kapcsolatos technikai kihívásokra.

SFAT sok lehetőséget kínál a fém vagy rétegelt (laminált) lemezek elemzéséhez olyan formában, hogy azokat rétegről rétegre vizsgáljuk, vagy pedig un. homogenizált anyagként kezeljük. Különböző kialakítású kötések, kapcsolódások vehetők figyelembe, mint például kiálló vagy süllyesztett fejűek. A rétegek kötőeleme lehet tömör vagy üreges. Az érintkező rétegek közötti vékony felület geometriai és anyagi tulajdonságai definiálhatók (pl. a felület tisztasága). A kialakuló nyíróterhelés elemezhető persely vagy persely nélküli kialakítással, ill. a kötőelemek előfeszítésének esetleges figyelembevételével is. Ezen lehetőségeket szemlélteti az 1. ábra.



1. ábra: Egyetlen rögzítőelemet elemző eszköz. Példák használati esetekre

¹ National Aeronautics and Space Administration

² Dr. Szabó Barna: Model Development in the Engineering Sciences: <https://www.esrd.com/model-development-in-engineering-sciences/>

Példa: Nagyértékű objektumok

Jó példa a magas értékű objektumok ikreire a nagy betongátak szerkezeti állapotának ellenőrzése. A franciaországi Provence-ban épült Malpasset-gát 1959-es összeomlását követően a Világbank előírta, hogy minden pénzügyi támogatást igénylő gátprojektet modellezni és tesztelni kell az olaszországi *Modellek és Szerkezetek Kísérleti Intézetében*³ (ISMES). Ezt követően az ISMES-t megbízták egy olyan rendszer kifejlesztésével, amely figyelemmel kíséri a nagy gátak szerkezeti állapotát. A gátakat műszerekkel látták el, és egy numerikus szimulációs keretrendszert fejlesztettek ki, amelyet ma digitális ikernek hívunk, és amelyet a műszerek által jelzett anomáliák kiértékelésére használnak.

Már kezdetben nyilvánvaló volt, hogy a numerikus közelítési hibákat kis tartományokra (tűrésekre) kell korlátozni annak érdekében, hogy azok a mérési hibákhoz képest elhanyagolhatóan kicsik legyenek. A számítások elvégzéséhez az 1970-es évek második felében az ISMES-en egy p-verzió alapuló végelelemes programot hozott létre Dr. Alberto Peano, (volt DSc. hallgatóm) irányításával. Ez a program még ma is használatban van FIESTA néven [4].

A digitális ikrek létrehozása a modellfejlesztés minden aspektusát felöleli. Ebből következik, hogy a modellben foglalt feltevésekkel kapcsolatos hibákat külön kell kezelni a numerikus közelítés hibáitól, valamint ellenőrzési, érvényesítési és bizonytalanság-számszerűsítési eljárásokat kell alkalmazni. A modellt frissíteni és újra kalibrálni szükséges, amikor új elgondolásokat javasolnak, vagy új adatok válnak elérhetővé. Az egyetlen különbség az, hogy a digitális ikrek esetében a frissítések a fizikai objektum élettartama során gyűjtött egyedi objektum-specifikus adatokat is tartalmaznak.

Modellfejlesztési projekteket **progresszív, stagnáló** és **nem megfelelő** kategóriába soroljuk. Egy modellfejlesztési projekt progresszív, ha a kalibrálás tartománya növekszik, stagnáló, ha nem növekszik, és nem megfelelő, ha a problémamegoldó gépezet nem konzisztens a matematikai modell megfogalmazásával, vagy nem teszi a megoldás ellenőrzését lehetővé [3]. A szimuláció irányításának célja biztosítani, hogy a digitális ikrek fejlesztése

progresszív legyen. Sajnos a szimulációk helyes irányításának gyakori hiánya miatt a modellfejlesztési projektek túlnyomó többsége nem megfelelő minősítést érdemel.



Prof. Dr. Szabó Barna

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

Irodalomjegyzék

- [1] Allen, D. B. Digital Twins and Living Models at NASA. Keynote presentation at the ASME Digital Twin Summit. November 3, 2021.
- [2] Grieves, M. and Vickers, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt and A. Alves (eds) Springer International Publishing, Switzerland, pp. 85-113, 2017.
- [3] Szabó, B. and Actis, R. The demarcation problem in the applied sciences. *Computers and Mathematics with Applications*. 162 pp. 206–214, 2024.
- [4] Angeloni, P., Boccellato, R., Bonacina, E., Pasini, A., Peano, A. Accuracy Assessment by Finite Element P-Version Software. In: Adey, R.A. (ed) *Engineering Software IV*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1985. https://doi.org/10.1007/978-3-662-21877-8_24

A felelős szerkesztő megjegyzése: Bármilyen kérdést, észrevételt, kezdeményezést örömmel várunk és továbbítunk Szabó professzor úrnak.

³ Istituto Sperimentale Modelli e Strutture, Bergamo