

# Anyagvizsgálatok és kiértékelésük innovatív módszertana

Innovative Methodology for Material Tests and their Evaluation

Fekete Tamás

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, főtanácsos, fekete.tamas@ek.hun-ren.hu

## Kulcsszavak

roncsolásos anyagvizsgálatok, kiértékelés, szimuláció, digitális pár

## Keywords

material testing, evaluation, simulation, digital twin

## Absztrakt

A nagyméretű nyomástartó rendszerek Szerkezetintegritási Számításainak célja a főként az energetikai iparban és a nehéziparban üzemelő technológiai rendszerek biztonságos működtetési határainak elvárt pontosságú előrejelzése. A modern kontinuum termomechanika ígéretes elméleti alapként tűnik a Szerkezetintegritási Számítások modern módszertana számára, ám az elméletben rejlő potenciált az ipari alkalmazásokban még nehéz kihasználni. Ennek az az egyik fő oka, hogy az elméletben használt konstitutív modellek paramétereit csak nagy bizonytalansággal nehéz meghatározni, amennyiben azokat az anyagvizsgálati mérések eredményeiből a hagyományos – a megfelelő anyagvizsgálati szabványokban fellelhető – kiértékelési módszerekkel származtatják le, különösen, ha az alakváltozások nagyobbak. Ezért olyan kutatást kezdeményeztünk, amelynek célja a Szerkezetintegritási Számítások fejlesztés alatt álló modern módszertana követelményeit kielégítő anyagvizsgálati és kiértékelési eljárás kidolgozása. A tanulmányban a roncsolásos anyagvizsgálatok és kiértékelésük általánosított módszertanának alapjait ismertetjük.

## Abstract

The purpose of Structural Integrity Calculations for Large-Scale Pressure Systems is to predict the safety limits of technological equipment, operating mainly in the energy and heavy chemical industries, within the expected accuracy. Modern Continuum Thermomechanics appears to be a promising theoretical framework for a modern methodology of Structural Integrity Calculations, but its potential is still difficult to realize in industrial applications. One key reason for this is that constitutive model parameters used in theory can be estimated with high uncertainty, if they are derived from material tests using conventional evaluation methods available in the relevant material testing standards, especially when deformations are higher. Research has therefore been initiated to develop a material testing and evaluation procedure that meets the requirements of the Structural Integrity Calculations methodology under development. In this paper, the basics of a generalized and innovative methodology for destructive material testing and evaluation are presented.

## 1. Bevezetés

Ezen lapszám előző tanulmányában [1] nagyméretű nyomástartó rendszerek *Szerkezetintegritási Számítási módszertanának* időszerű kérdéseivel foglalkoztunk. Nagyméretű nyomástartó rendszerek működnek mindegyikük a villamosenergia iparban, a nehéziparban, részét képezik a kulcsfontosságú energiaellátó rendszereknek, hogy csak néhány példát említsünk. A nagyméretű nyomástartó rendszereket már hosszú évtizedek óta korlátozott élettartamra tervezik. Azt az élettartamot, amelyet a rendszer – a tervező szándéka szerint – „a várható üzemi körülmények között elér” [2], nevezik *tervezési élettartamnak*, és értékét, a várható üzemi körülményekkel együtt, a tervezési specifikáció rögzíti. A tervek kidolgozása folyamán a konstruktőrök tervezési biztonsági számításokkal becsülik meg a megvalósítandó rendszer *várható élettartamát*. Amennyiben a *Tervezési Biztonsági Számítások* igazolják, hogy a rendszer *várható élettartama* hosszabb, mint a *tervezési élettartam*, akkor a rendszert az üzembehelyezéstől a tervezési élettartam végéig biztonságosan üzemeltethetőnek ítélik. Az üzemeltetés idején *Szerkezetintegritási Számításokkal* tesznek előrejelzéseket a nyomástartó rendszer *műszakilag megengedhető üzemidejére*, azaz, hogy mennyi a rendszer *várható élettartama* a megvalósult terheléstörténet és a prognosztizált várható üzemi körülmények adatai alapján. A *Tervezési Biztonsági Számításokat* az adott iparág nemzetközileg vagy helyileg elfogadott tervezési szabványainak és ajánlásainak betartásával készítik el – pl. atomerőművek esetén az ASME [3], az RCCM [4], a KTA [5], a VDI [6], a PNAE [7] vagy az RD EO [8] –. A *Szerkezetintegritási Számítások* során figyelembe veszik a rendszerek egyedi gyártásából és üzemeltetési körülményeiből eredő különbségeket – azaz a szerkezeti anyagaik rendszerspecifikus

termomechanikai és öregedési jellemzőit –, valamint a kifejezetten az üzemelő rendszerek biztonsági elemzéseikhez kidolgozott ajánlásokat, mint pl. az IAEA PTS Guideline [9], a nemzetközi jó gyakorlatot összefoglaló IAEA TECDOC-1627 [10] vagy a VERLIFE útmutató [11], azonban azt kell megállapítanunk, hogy módszertani szempontból ma a *Szerkezetintegritási Számítások* inkább tekinthetők az adott rendszer egyedi jellemzőihez szabott *Tervezési Biztonsági Számításoknak*, mint a rendszerben zajló fizikai folyamatok mélyebb megértésén alapuló, a szabványok követelményein túlmutató elemzéseknek. Mindezek mellett a nukleáris iparban a klasszikus, túlnyomórészt szabványokon alapuló *Szerkezetintegritási Számításokkal* is meg lehetett alapozni a megfelelő atomerőművi blokkok tervezési élettartamon túli üzemeltetésének első szakaszát. Ezt nagyban segítette, hogy a legfontosabb berendezések anyagvizsgálati programjai során végzett öregítési programok eredményei azt mutatták, hogy a berendezéseknek az üzemidőhosszabbítás során várható öregedése még nem fogja elérni a szerkezeti anyagok öregítési programokban elért öregedési állapotát.

Manapság napirendre került az atomerőművi blokkok tervezési élettartamon túli üzemeltetési ideje további meghosszabbításának kérdése. Ebben az esetben már felmerülhetnek olyan kérdések, hogy tartalmaznak-e az eddig végrehajtott anyagvizsgálati programok annyi és olyan minőségű információt, amennyi alapján a hagyományos módszertanra épített *Szerkezetintegritási Számítások* eredményei ugyanolyan érvényesnek lesznek tekinthetők, mint eddig. A válasz ma még nem teljesen kiforrott, ugyanis a megcélzott üzemeltetési időn túlmutató időszakra is érvényes öregítési állapotokra sokkal kevesebb információ áll rendelkezésünkre, mint az ezt megelőző időszakban jellemző állapotokra. Ugyanakkor ismert, hogy a *Szerkezetintegritási Számítások* nemzetközi jó

gyakorlaton alapuló, korszerűnek mondott módszertana a szerkezeti anyagok viselkedését rendkívül egyszerű módon, a teherviselő kapacitásukat nagyon konzervatíván megítélő konstitutív modelleken alapul. Mindez azt jelenti, hogy időszerű lehet a *Szerkezetintegritási Számítások* módszertanát újragondolni.

Ezért kezdeményeztünk évekkel ezelőtt olyan kutatásokat az Energiatudományi Kutatóközpontban (EK), melyeknek célkitűzése a *Szerkezetintegritási Számítások* módszertanának korszerű alapokra helyezése, és ez alapján egy új *Szerkezetintegritási Számítási Módszertan* kifejlesztése. [1]-ben áttekintettük a problémakört és az új módszertan elméleti alapját. Az elméleti modell alapja a *Törésmechanika Nemlineáris Mezőelmélete*, egy, a modern kontinuum termodinamikában mélyen gyökerező törésmechanikai elmélet, amelyre célkitűzéseink szerint a jövőben a Szerkezetintegritási Számítási módszerek építhetők. Az elméleti modell sokkal átfogóbb, ezért komplexebb, mint azok a diszciplináris alapon fejlesztett klasszikus modellek, amelyekre a mérnöki gyakorlatban széleskörűen elterjedt számítási eljárások épülnek: egyfelől egyszerre több, egymással csatolt fizikai folyamatot követ, másfelől erős nemlinearitásokat is tartalmaz. Az elmélet alapján felépített új modellek validálása, majd a gyakorlati feladatok megoldására történő adaptálása ezért további kérdéseket vet fel, melyek megválaszolásához feltétlenül fontos átgondolni, hogy a vázolt elmélet termodinamikai elmélet, ezért a szerkezeti anyagok modellje sem szorítkozhat a pusztán mechanikai viselkedés leírására. Következésképpen a szükséges anyagtudományi mérések során a próbatestek termodinamikai válaszát kell megfigyelni. Az anyagvizsgálatok és kiértékelésük termodinamikai szellemben történő újragondolása ma még megoldásra váró feladat [12]. Ugyanakkor az elmélet termodinamikai megalapozásától függetlenül is nyilvánvaló, hogy ahhoz olyan mérési és mérés-kiértékelési metodológiák szükségesek, amelyek a hagyományos anyagvizsgálati eljárások esetén is megteremtik a kísérletek és az elmélet között a szükséges összhangot. A termodinamikai szemléletnek az anyagtudományi mérések módszertanába történő integrálása mindenekelőtt azt jelenti, hogy a mérések során egy próbatest viselkedéséről lényegesen több és jobb minőségű információt kell gyűjteni, mint amit a szakítóvizsgálatokra, pl. az ISO 6892-1 [13], ISO 6892-2 [14], ISO 6892-3 [15] és az ASTM E8/E8M-22 [16], vagy a törésmechanikai jellemzők mérésére vonatkozó ISO 12135 [17], ASTM E 399-22 [18], ASTM E 1820-23 [19] illetve az ASTM E 1921-22 [20] vizsgálati szabványok jelenleg előírják, beleértve azt a szempontot is, hogy ha az elméleti leírás egyszerre több fizikai mezőt is bevon a leírásba, akkor az anyag vizsgálata során a leírásba bevont mezők közül lehetőleg az összeset, vagy ha ez megvalósíthatatlan, akkor minél több megfigyelhető mezőt meg is kell figyelni. A megfigyelések során rögzített adatokat az elméleti modell követelményeinek megfelelően kell kiértékelni [21].

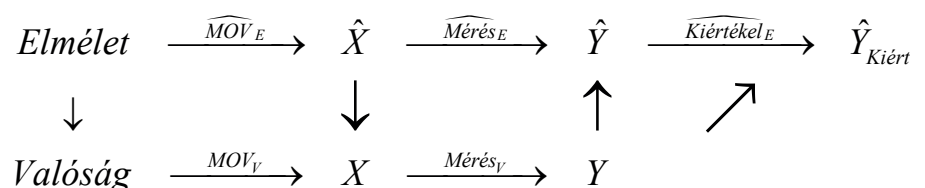
Tanulmányunk szerkezete a következő: a következő pontban dióhéjban ismertetjük az anyagtudományi mérések és kiértékelésük metrológiai alapú modelljét, ezt követően az anyagtudományi mérések és kiértékelésük fizikai alapú konceptuális modelljének alapjait mutatjuk be, a modellben kulcsszerepet játszó *Digitális Pár* koncepcióval együtt. A dolgozatot az összefoglalás és az irodalomjegyzék zárja.

## 2. Anyagtudományi mérések és kiértékelésük metrológiai alapú modellje

Absztrakt szinten, mintegy „madártávlatból” szemlélve a mérések kérdéskörét, egy mérésnek az a célja, hogy egy vizsgálatra kijelölt objektumról – a felvetett probléma megoldása szempontjából – releváns információt nyerjünk. A klasszikus méréselmélet a mérést olyan műveletnek fogja föl, amely az összes mérési eredményt tartalmazó halmazból kiválasztja az éppen aktuális értékeket [22]. Ha  $X$  a vizsgált objektum lehetséges állapotainak tere,  $Y$  az aktuális mérési eredmények tere, akkor a mérés (*Mérés*) egy ( $X \xrightarrow{\text{Mérés}} Y$ ) alakú leképezés. A (*Mérés*) leképezést a mérés absztrakt modelljének [23] nevezik, amelyben a mérés folyamatát klasszikus metrológiai alapállásból szemlélik és olyan input-output problémának tekintik, amelyben a folyamatot fekete doboznak vélik. Ezért ezt a modellt a mérés *fekete doboz* modelljének [24] nevezik. A modellel szemben felvethető, hogy nem kellően informatív. A következő szempontokra nem fordít ugyanis kellő figyelmet:

1. a mérések során speciális, a tanulmányozott objektum és a mérőeszköz közötti kölcsönhatás(ok) indukálta folyamatok zajlanak; ezek a folyamatok határozzák meg, hogy a mérés során mit, hogyan figyelnek meg;
2. a méréseket mindig elő kell készíteni;
3. a megfigyelések eredményei nem azonosak a mérések eredményeivel.

A szakirodalomból (is) ismert [25], hogy a vizsgálat(ok)nak alávetett mérési objektumok és módszerek típusait az a fizikai elmélet határozza meg, amelyben a vizsgálatra vonatkozó kérdést megfogalmazták; a mérést leíró fizikai modellt az elmélet keretében dolgozzák ki. A vizsgálatok elsődleges eredményeit ugyancsak az elmélet keretein belül értelmezik, majd az elmélet eszközeivel származtatják le az indirekt úton – csak számítással – meghatározható fizikai mennyiségeket. A mérés 1-3. szempontot is figyelembe vevő, az elméleti és a kísérleti aspektusát egyaránt szemléltető absztrakt modelljét (amit konceptuális modellnek vagy konceptuális sémának is nevezünk) az alábbi diagramon mutatjuk be (1. ábra).



1. ábra: Fizikai elmélet és a kísérlet konceptuális sémája

A diagramon *Elmélet* jelöli az elméleti fizikai keretrendszert, amely a *Valóság*-ban, azaz a külső világban zajló folyamatokat értelmezi, és amelyben a *Valóság*-ra vonatkozó kérdéseket felvethetjük és a válaszokat értelmezzük [24]. Az *Elmélet* és a *Valóság* közé „húzott” nyíl (*Elmélet* → *Valóság*) azt fejezi ki, hogy az elmélet határozza meg, milyen típusú *vizsgálatokra* van szükség a felvetett kérdések megválaszolásához, illetve a felvetődő problémák megoldásához. Az  $MOV_L$ -el jelölt nyilak ( $L=E, V$ ) azt jelentik, hogy az adott típusú méréshez a megfelelően előkészített *Mérési Objektumot* (*MO*) kell *Választani* (innen az *MOV* rövidítés). Az *Elmélet*-ben  $MOV_E$  azt szimbolizálja, hogy a kiválasztott típusú mérési objektum elméleti modelljét meg kell alkotni; a *Valóság*-ban  $MOV_V$  azt jelenti, hogy az objektumot a mérésre elő kell készíteni.  $\hat{X}$  és  $X$  a vizsgált objektum lehetséges állapotait,  $\hat{Y}$  az aktuális mérési eredményeinek halmazát írja le az *Elmélet*-ben,  $Y$  pedig a *Valóság*-ban. Az  $\hat{X} \longrightarrow X$  nyíl azt fejezi ki, hogy az elmélet megszorításokat tartalmaz az értelmezhető állapotok terére, azaz megszabja, hogy *Valóság*-ban a megfigyeléseket milyen körülmények között kell végrehajtani. A mérés folyamatát a *Valóság*-ban  $Mérés_V$  írja le, míg az *Elmélet* rétegben  $Mérés_E$ . Az  $Y \longrightarrow \hat{Y}$  nyíl azt az átalakítást jelöli, melynek során a mérés primer eredményeit az elméletben megkívánt alakba transzformálják. Az *Elmélet*-ben a  $Kiértékel_E: \hat{Y} \longrightarrow \hat{Y}_{Kiért}$  leképezés az indirekt úton meghatározható fizikai mennyiségek kiértékelésének folyamatát írja le. A diagram kifejezi az alábbi állításokat: (1) a mérést elméleti és gyakorlati előkészítő munkák előzik meg; (2) a mérés folyamatát elméleti modellen követjük; (3) az indirekt módszerekkel meghatározható fizikai mennyiségeket az elmélet segítségével határozzák meg.

Az általános megfontolások után az anyagvizsgálatokra térve: a vonatkozó szabványok – pl. az ISO 6892-1 [13], ISO 6892-2 [14], ISO 6892-3 [15] és az ASTM E8/E8M-22 [16], vagy a törésmechanikai jellemzők mérésére vonatkozó ISO 12135 [17], ASTM E 399-22 [18], ASTM E 1820-23 [19] illetve az ASTM E 1921-22 [20] – alapján elég világosan kirajzolódik, hogy azok a mérésekről és a kiértékelési eljárásokról igen egyszerű képet festenek. A próbatest modellje legtöbbször egy, vagy legfeljebb néhány elemből álló, nagyon egyszerű, diszkrét geometriai objektum, amely a névleges fő méreteivel pontosan jellemezhető. Amennyiben egy próbatest geometriai méretei a mérés előtt a rá vonatkozó szabvány előírásai szerinti méret-tűrés mezőn belül vannak, akkor a végrehajtandó mérés ebből a szempontból kielégíti a követelményeket. Ha a – megfelelő eszközön végrehajtott – vizsgálat sikeresnek tekinthető, akkor a mérés során megfigyelt és rögzített mennyiségek alapján a mérés értékelhető. A mérés kiértékelését a szabvány adta modellen, az ott rögzített szabályokat követve végzik.

A mérésekről és kiértékelési eljárásaikról élénk tárt meglehetősen egyszerű kép a szabványok megalkotása korának „tudományos-mérnöki világképében” természetesen voltak, ám a szövegek az ezeket megindokoló megfontolásokat nem tartalmazzák. Ezen oknál fogva

az indoklásokra rejtett (hallgatolagos vagy tacit – a latin tacitus = csendes, észrevétlen, hallgatag melléknévből) tudásként gondolhatunk. Mára a „tudományos-mérnöki világkép” jelentősen megváltozott, és az évtizedekkel ezelőtti rejtett tudás sokak számára nem magától értetődő, talán ismeretlen. Ezért a szabványoknak a mérésekről alkotott – mai szemmel nézve túlzottan egyszerűsítőnek tűnő – felfogásához az alábbi megfontolásokat ajánljuk a tisztelt olvasó figyelmébe: (1) a szabványok kidolgozása idején a tudományos és a mérnöki szakmai közösségek számítási kapacitásai olyan korlátozottak voltak, hogy az egy, vagy legfeljebb néhány pontból vagy egyszerű elemből álló modellek dinamikai vagy peremérték problémáinak megoldása is jelentős emberi erőforrást és hosszú időt vett igénybe; (2) a tűrésmezőre vonatkozó követelmények azokon a megfigyeléseken alapultak, hogy amennyiben a próbatestek geometriájának a névleges méretektől megfigyelt eltérései a szabvány megengedte bizonytalansági sávon belül vannak, akkor a mérés során, egy bizonyos kritikus terhelési határig, a próbatestek reakcióinak eltérései is korlátos bizonytalansági sávon belül maradnak; (3) a mérések – ilyen egyszerű modellek segítségével kiértékelt – eredményeit felhasználó méretezési és biztonsági számítások alapján megvalósított mérnöki alkotások az esetek túlnyomó többségében használhatónak bizonyultak. Még az atomerőművek – Bevezetésben említett – tervezési élettartamon túli üzemeltetése első szakaszának biztonságos megvalósíthatóságát igazoló *Szerkezetintegritási Számításokat* is az említett anyagvizsgálati szabványok szerint végrehajtott vizsgálatok támogatták.

Napjainkra azonban a helyzet némileg megváltozott. Az atomenergetikában intenzív kutatások folynak az arra alkalmasnak látszó erőművi blokkok tervezési élettartamon túli üzemeltetése második szakaszának megvalósítása feltételeinek igazolására. Mára a szerkezeti anyagok lényegesen jobban megöregedtek, mint az előző üzemidő-hosszabbítási programok idején voltak, és a szerkezeti anyagok öregedési trendjeinek távolabbi jövőre vonatkozó értékeit kevesebb rendelkezésre álló anyagmintából kell meghatározni. Ezért az anyagvizsgálatokhoz egyre kisebb méretű próbatesteket fognak használni; a vizsgálati technológia egyre nagyobb teret hódít a nukleáris ipari és a fúziós kutatásokban [26]. A miniatürizált próbatesteken végzett mérések olyan problémákat is felszínre hoznak, amelyek eddig nem igényeltek különös figyelmet és megfontolásokat, pl. hogy sokkal érzékenyebbé válnak a gyártási mérettűrésekre, illetve általánosabban, a próbatest tényleges alakjára, mint a [13-20] vizsgálati szabványok előírásainak megfelelő méretű próbatestek. Ezek a kérdések felvetik a mai szabványokon túli módszerek fejlesztésének és használatbavételének kérdését. A cikk hátralevő részében az anyagtudományi mérések végrehajtására és kiértékelésére fejlesztett olyan módszertan alapjait mutatjuk be, ami túlmutat a jelenlegi szabványokban alkalmazott módszertan keretein, ám azokat speciális esetként tartalmazza.

### 3. Anyagtudományi mérések és kiértékelésük fizikai alapú modellje

#### 3.1 Általános megfontolások

Amint említettük, a *Szerkezetintegritási Számítások* új módszertana a modern *Termomechanikára* épül [1]. Ennek következtében a vizsgált rendszerek termomechanikai állapotának változásait sokkal finomabban, részletgazdagabban lehet követni az elméleti számításokkal, mint a klasszikus mérnöki modellekkel, mert megnyílt a lehetőség az egyszerre több, egymással csatolt fizikai folyamatot leíró, multifizikai modellek kidolgozására, valamint a testben rövidebb hosszskálákon zajló folyamatok makroszkopikus hatásainak fenomenológiai modellezésére. A részletgazdag elméleti modell nagy mennyiségű információt képes szolgáltatni a rendszer viselkedéséről. Ahhoz, hogy a nagy mennyiségű információ jó minőségű is legyen, az elméleti modell működtetéséhez a szükséges mennyiségű és minőségű információt anyagvizsgálatokkal meg kell szerezni, amelyeket aztán az elméleti modell igényeinek megfelelő formában kell kiértékelni, vagy a kiértékelés eredményeit kell az elméleti modell igényeinek megfelelő formába transzformálni. Ezért a koncepcióban a méréstől elválaszthatatlannak tekintjük az információ megszerzését, feldolgozását és transzformációját. Az ötlet tulajdonképpen nem teljesen új, mert az utóbbi évtizedekben a tudományos vagy mérnöki problémák megoldása során egyre fontosabb szempont, hogy egy adott rendszerről, milyen mennyiségű és minőségű információból kiindulva, milyen mennyiségű és minőségű információt vagyunk képesek valamilyen, elméleti és/vagy kísérleti, módszerrel előállítani.

Ma már furcsának tűnik, hogy a fizikában az információ és az információ áramlásának problémakörével a 20. század közepéig igen kevesen foglalkoztak. Ennek egyik, nem elhanyagolható oka az lehet, hogy az elméleti fizika addig túlnyomórészt zárt rendszerek tanulmányozásával foglalkozott. Az elméleti fizika és az információ-elmélet általános, egységes keretbe foglalásához az atomfizikus Szilárd Leó [27], Gábor Dénes – a „holográfia atyja” [28] – és Léon Brillouin [29] olyan alapvető munkákkal járultak hozzá, amelyek alapját képezik mai kutatásoknak is. Brillouin vezette be az információelméletet a fizikába, és mutatta ki, hogy az információ és az entrópia szorosan összefüggő fogalmak, mintegy „irányt szabva” ezzel a termodinamika információelméleti irányzatának is.

Az információelméleti szempont bevezetése a mérések elméletébe az utóbbi egy-két évtizedben kezdődött meg – ld. pl. [30-32] –. A méréselmélet tudományos és mérnöki diszciplínákon átívelő elméletének mai állásáról ad igen jó áttekintést L. Mari, M. Wilson és A. Maul monográfiája [24]. A mérések elméleti alapjainak kutatása napjainkban azért is különösen időszerű, mert a mai intelligens rendszerek viselkedése mérések garmadáján, az azokból származó információk feldolgozásán, továbbá a vezérlőrendszer ezen információkon alapuló utasításait végrehajtó beavatkozórendszer működésén múlik. Így a mérések elmélete szorosan összefonódik a vezérlések

és szabályozások általános elméletével, a *Kibernetikával*, amely nélkül a mai *KiberFizikai Rendszerek (KFR)* nem léteznének.

A *Kibernetikát*, mint önálló tudományos területet Norbert Wiener 1948-ban kiadott „*Cybernetics: or control and communication in the animal and the machine*” című könyvében alapozta meg [33]. Mint minden tudományos kutatási területnek, a Kibernetikának is vannak az ókori görög nagy filozófusokra visszavezethető előzményei. A kibernetika szó az ógörög *ἁρετης κυβερνητικης* kifejezésből származik, amellyel a hajók *gyakorlott, magas éthosú, felelősségteljes, jó kormányosait* jellemezték, kifejezve, hogy olyan, gyakorlott emberekről van szó, akik mesterségüket művészi fokon gyakorolják; a kifejezést metaforaként a városok, államok vezetőire is átvitték, és velük szemben, mint követelményt értelmezték [34]. A kifejezés Platónnál és Arisztotelésznél is több helyütt felbukkan; Arisztotelész inkább a *ῥυβερνητικη τέχνη* kifejezést használta előszeretettel, hangsúlyozva, hogy a *ῥέχνη* nem pusztán tudást vagy készséget, hanem teleológiai, célorientált tevékenységet jelent [34]. Az újkori, természettudósok által publikált irodalomban Ampèrenek 1834-ben írt – „*Essai sur la philosophie des sciences; Exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines*” című – esszékötete [35] politikáról szóló fejezetében, a kormányzásról írt szócikk címében bukkan fel a *'cybernetique'* kifejezés. A szó etimológiáját így foglalja össze: a kibernetika „*a kormányzás, az irányítás egészen általános értelemben vett művészete/tudománya*” – ld. [35] 141. –. Bár erre írásos utalással/bizonyítékkal nem rendelkezünk, az a tény, hogy Ampère ugyanabban a kontextusban, szinte pontosan abban az értelmezésben használja a *'cybernetique'* kifejezést, mint Platon vagy Arisztotelész, megengedi annak legalább a feltételezését, hogy valamilyen forrásból ismerte a nagy görög gondolkodók műveit.

Az 1950-es évektől kezdve az angolszász dominanciájú nyugati fejlesztési irányzatban a Kibernetikától fokozatosan önállósodott az *Információ-Tudomány* és az *Információ-Technológia (IT)*, amely megteremtette a mai nagysebességű informatikai rendszerek alapjait. Ugyanakkor az orosz (a 20. század közepén szovjet) iskola értelmezése szerint a Kibernetika – mint tudomány – tárgya mindenféle olyan rendszer, amely irányítási célokra történő felhasználás céljából képes információt fogadni, tárolni és feldolgozni (beleértve az információ transzformációját is) [36].

Az orosz Kibernetikai Iskola képviselője, Alexander Fradkov dolgozta ki a Kibernetika és a Fizika alapelveinek egyesítéséből lezármaztatott Kibernetikai Fizikát. A Kibernetikai Fizika első, átfogó jellegű ismertetése [37]-ben és [38]-ban található. Fradkov azt mondta ki, hogy az irányítás és a kommunikáció nemcsak az élővilág és az ember alkotta mérnöki szerkezetek jellegzetessége, hanem – a kibernetika kifejezést az eredeti görög *'κυβερνητική'* szó etimológiája, azaz *vezetés, irányítás, kormányzás*, szerint értelmezve – a természeti folyamatok irányításának, kormányzásának nagyon általános elve. A Kibernetikai Fizika (Cybernetical Physics) megnevezést, és a tudományág meghatározását [39]-ben és [40]-ben

használta, mint a fizika és a kibernetika határterületén kiépülő, olyan interdiszciplináris tudományágat, amelynek célkitűzése tetszőleges fizikai rendszer lineáris, nemlineáris, optimális és adaptív irányítása, a paraméterek azonosítására, szűrésére és becslésére, továbbá a rendszerek optimalizálására vonatkozó feladatok megoldása; [41]-ben válogatott példák mutatják be, hogy az irányítási, vezérlési és a stabilitási kérdések a Fizika minden ágában felvetődnek, ha a kérdést úgy teszik fel. A kérdés feltevésének módját a megfelelő elméleti rendszermodell tartalmazza. A Kibernetikai Fizikában a rendszermodelleket úgy építik fel, hogy azok a vezérlési és irányítási célú csatolásokat is tartalmazzák. A kibernetikai elvek, módszerek és a modern termodinamika kapcsolata különösen fontos, hiszen a termodinamika és az információelmélet kapcsolata évtizedek óta ismert – ld. pl. [29] és [42] –. A Kibernetikai Fizika alapelveinek és módszereinek az egyensúlytól távoli rendszerek termodinamikájában történő alkalmazásáról részletes ismertetés található [43]-ban.

A Kibernetikai Fizikára vonatkozó eddigi fejtegetések célja az volt, hogy bemutassuk azt a háttérelméletet, amely a fizikai rendszerek – ezen belül kiemelten a termodinamikai rendszerek – viselkedésének olyan leírását teszi lehetővé, amelybe a rendszer irányításának, vezérlésének leírása is beletartozik. Korábban már bemutattuk [1], hogy a *Szerkezetintegritási Számítások* új módszertana a modern *Termomechanikára* épül, amely a számításokkal leírni kívánt rendszereket nemegyensúlyi termodinamikai rendszernek tekinti. Az elmélet meghatározza a számításokhoz szükséges anyagtörvényeket, amelyeknek paramétereit az elmélet igényeinek megfelelően felépített és végrehajtott anyagvizsgálati eljárásokkal kell meghatározni. Ez azt jelenti, hogy az anyagvizsgálatokat a modern termodinamika keretein belül kell értelmezni, megtervezni, végrehajtani és kiértékelni, ami ma még aktuális kutatási kérdések megválaszolását igényli [12]. A témakör részletesebb kifejtése nélkül is nagyon könnyen belátható, hogy a modern termodinamika szellemében felépített és elvégzett mérések megalapozásának igényei túllépnek a mai, fent említett anyagvizsgálati szabványok [13-20] – szerint elvégzett és kiértékelt mérések adta kereteken. A modern termodinamika elvei és formalizmusa alapján felépített számítási keretrendszer ugyanis még abban az esetben is sokkal több információt igényel egy anyagvizsgálati méréstől, ha azt alapjaiban egy ma érvényes anyagvizsgálati szabvány szabályai szerint építették föl. Az ilyen és hasonló problémák megoldása során nyújt felbecsülhetetlen értékű segítséget, ha megfelelő háttérelmélet áll rendelkezésünkre az általánosított probléma értelmezéséhez és megoldásához. Egy ilyen keretelmélet a Kibernetikai Fizika, bár ezt az elméletet az angolszász világban manapság kevesen ismerik.

### 3.2 A Digitális Pár koncepció és az ahhoz vezető út

#### A Kiberfizikai rendszer

A *Kiberfizikai Rendszer (KFR)* ma széles körben használt fogalmát és értelmezését Helen Gill, a *US NSF* munkatársa vezette be 2006-ban. *KFR*-en olyan (mérnöki)

rendszereket ért, amelyek fizikai és számítás-intenzív tevékenységre alkalmas informatikai komponensek szorosán csatolt, szinergisztikus együttműködésén alapulnak [44]. Bár a *KFR*-ek alkalmazási területe 2006 óta rohamosan növekszik, definíciója lényegét tekintve nem változott [44]; ezt a definíciót széles körben átvette a mérnöki tudományos szakirodalom – pl. [45], [46] –. Nagyrészt erre a definícióra alapozva dolgozták ki az utóbbi évtizedben az intelligens üzemek (*Smart Factories*) [47], a *Kiberfizikai Gyártó Rendszerek (KFGYR, angolul: Cyber-Physical Production System, CPPS)* [48] és az Ipar 4.0 [47] koncepció- és kutatási terveit. A *KFR* koncepcuális modellt használják többek között az intelligens energiarendszerek (*Smart Grids*), az intelligens városok (*Smart Cities*), az önvezető autók és az egészségügyi rendszerek fejlesztését tárgyaló stratégiai dokumentumokban [45] és [46]. A *KFR*-ek legfontosabb jellemzői a következők:

1. valóság-hű modelleken végrehajtott, számítás-intenzív szimulációkat használnak
  - a. azok tervezése során, valamint
  - b. a megépített és üzemelő rendszerek működésének előrejelzésére;
2. szabályozott, intelligens műszaki rendszerek [49];
3. vezérlésükben és szabályozásukban *IT* rendszereket alkalmaznak.

A *KFR* koncepció újszerűségét másfél évtizede nem az jelentette, hogy teljesen új építőkövekből alkották meg, hanem hogy ezeket az – egyébként már ismert, és a mérnöki tudományok diszciplínáiban használt – elemeket egységes rendszerbe szervezték. Találó Jasperneite megállapítása [67], miszerint a *KFR* modell, illetve a modell alapján kifejlesztett Ipar 4.0 alapjában véve „*Alter Wein in neuen Schläuchen*”, azaz „*új tömlőbe töltött régi bor*”. A *KFR* „*új tömlőjét*” a nagy műveleti- és adatátviteli sebességekre, továbbá korábban elképzelhetetlen mennyiségű adat/információ gyűjtésére, továbbítására, feldolgozására és tárolására képes *IT* technológiák és infrastruktúrák (felhők, IoT stb.) gyors terjedése biztosítja.

Amiért a *KFR* modellt a különböző szakterületeken ténykedő kutatók, fejlesztő, tervező és technológus mérnökök mégis inkább „*új tömlőbe töltött új bornak*” tekinthetik, abban áll, hogy a számítás-intenzív feladatok megoldására alkalmas informatikai eszközök és technológiák nagy tömegben, elérhető áron történő széleskörű elterjedése lehetővé tette, hogy a komplex rendszerek fejlesztése, tervezése és üzemeltetése során, azok működésének ellenőrzésére és előrejelzésére, valóság-hű – azaz részletgazdag, nagy szabadságfokú – modelleken, erőforrás-igényes szimulációkat lehessen alkalmazni. Egy fejlesztés vagy tervezés alatt álló rendszer esetén a feltételezett használata/üzemeltetése során várható viselkedését elemzik, míg egy működő rendszer esetén a szimuláció a rendszer tényleges üzemeltetéséből származó hatások vizsgálatára, valamint a további üzemeltetés során várható hatások következményeinek előrejelzésére szolgál. A mérnöki rendszerek viselkedésének szimulációi csak akkor lehetnek kellően megbízhatók, ha:

- az alkalmazott modellek olyan fizikai háttér-elméleten

alapulnak, amely a megértés mai szintjén áll, és abból kiindulva, azok a feladat céljának megfelelő, szükséges mértékben ellentmondásmentesen írják le az adott – tervezés, vagy éppen felülvizsgálat alatt álló – mérnöki rendszerben zajló fizikai folyamatokat;

- a számításokhoz rendelkezésre áll minden olyan adat, ami a számítások előírt pontossági követelményeknek megfelelő végrehajtásához, továbbá azok felülvizsgálatához szükséges és/vagy elégséges.

Többek között ezek a követelmények vezettek el a fizikai rendszer *Digitális Párja (DP)* fogalmának megjelenéséhez (az angol szakirodalomban a digitális párt *'Digital Twin'*-nek nevezik, ami tükörfordításban *digitális ikerpárt* jelent; azonban véleményünk szerint a valós rendszer és annak *DP*-ja között információtartalom szempontjából nincsen akkora hasonlóság, ami az iker megjelölést indokolná). Egy *mérnöki rendszer DP*-ja mindazon ismeretek (elméleti tudás, mérnöki tapasztalat, leíró modellek, valamint a modellek elemzésekhez szükséges paraméterei és egyéb adatai, a mérnöki rendszer környezetének modelljei, és minden egyéb szükséges kiegészítő információ stb.) rendszere a 'digitális térben', amely ahhoz szükséges, hogy:

- a fizikai rendszer mindenkor aktuális állapotáról kellően megbízható tudással rendelkezünk, továbbá;
- annak rövidebb, illetve hosszabb időtávon várható jövőbeli viselkedésére prediktív erejű előrejelzéseket tehesünk.

Tao, Zhang és Nee [50] szerint a mérnöki rendszerek fejlesztése, tervezése és üzemeltetése során a *DP* koncepció alkalmazása egy gyakorlatorientált megközelítés, melynek az a célja, hogy a *KFR* modell alapján konstruált rendszerek viselkedését minél rövidebb idő alatt, megbízhatóan és olcsón lehessen elemezni. A *DP* családba tartozik az ipari fejlesztőlaborokban egyre inkább használt *digitális prototípus* is.

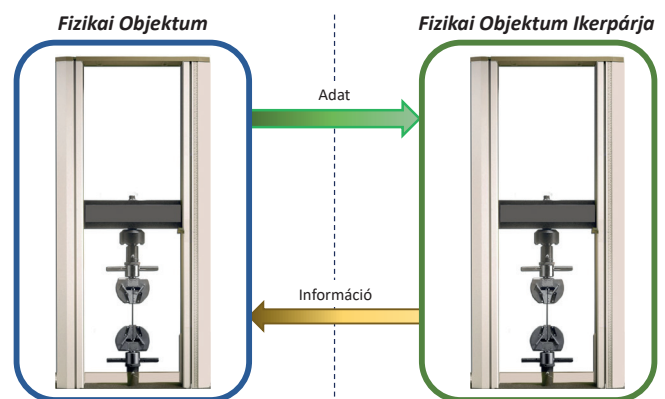
Az elmondottakat összegezve, a *KFR* modell a Kibernetika nyugati továbbfejlesztési szemléletén fogant – tudományosan és *IT* szempontból technológiailag is megalapozott –, praxisorientált konceptuális modell, melynek keretei között a fizikai valóság és a kibervilág szoros, zökkenőmentes együttműködése tudományos igényességgel megalapozható, illetve támogatható [50].

### A Digitális Pár

Amint említettük, a *KFR* koncepció olyan tudományos-mérnöki koncepció, ami elsősorban a mérnöki technológiák fejlesztésének támogatására összpontosít, és mint ilyen, inkább kutatásokra orientált terület. A *DP* koncepció a fizikai valóság és a kibervilág (vagy információs világ) szoros, zökkenőmentes együttműködésének, „fűzőjének” megvalósítását megcélzó pragmatikus irányzat, melynek célja a gyakorlatorientált mérnöki megoldások támogatása [50]. A *DP* egy valóságos objektum megfelelő leképezésekkel konstruált párja a virtuális térben, amelyet azzal a céllal hoznak létre, hogy segítségével egy tervezés alatt álló, vagy működő mérnöki objektum adott célnak megfelelő kialakítását, illetve működésének ellenőrzését adekvát modelleken végzett vizsgálatokkal támogassák.

Egy műszaki alkotás *ikerpárja* vagy *replikája* – hiteles másolata, utánezata – nem új fogalom. A kutatás-fejlesztésen túlmenően, régóta széles körben használják képzési, továbbképzési célokra. Termékfejlesztési problémák megoldása során a sorozatgyártás előtti utolsó prototípusok a végleges termék fizikai ikerpárjainak tekinthetők. Az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. Karbantartó Gyakorló Központjában található reaktortartály, gőzfejlesztő berendezés stb. a blokkokban üzemelő nagyberendezések fizikai ikerpárjai, amelyeket a karbantartó személyzet kiképzési, illetve továbbképzési feladatainak begyakoroltatására használnak. Vagy egy sorozatban gyártott anyagvizsgáló berendezés fizikai ikerpárja az a példány is, amelyen a gyártóközpontban a szervizhálózat szakembereit képzik, illetve, amelyet a felhasználói hibabejelentések okainak elemzésére használnak – ld. a 2. ábrát –.

Az 1960-as 70-es évek Apollo holdraszállási programja során a hajózó személyzetet a NASA központban már szimulátor segítségével készítették föl az utazásra. Az űrhajósok az űrhajó belső terének és a vezérlő konzolának ikerpárján keresztül kommunikáltak a rendszerrel. Az űrhajó viselkedését komplex programok szimulálták. A szimulátorrendszer segítségével a személyzetet az üzemzavari és a baleseti helyzetekre is felkészítették. A szimulátoron szerzett előzetes tapasztalatokkal a hátuk mögött könnyebb volt a valódi üzemzavari helyzeteket uralni. Az Apollo 13 1970 áprilisi útja során a földi irányítóközpont mérnökei a szimulátor segítségével tudták a hajózsze-mélyzetet egy majdnem végzetessé vált meghibásodás szükséges mértékű elhárításához hozzásegíteni úgy, hogy az űrben utazó kabinból kapott információk alapján a szimulátorral rekonstruálták a hibát, azonosították a lehetséges okát és kidolgozták az adott körülmények között alkalmazható megoldás(ok)ot. Ma az Apollo szimulátort az (egyik) első *DP*-nak tekintik [51].



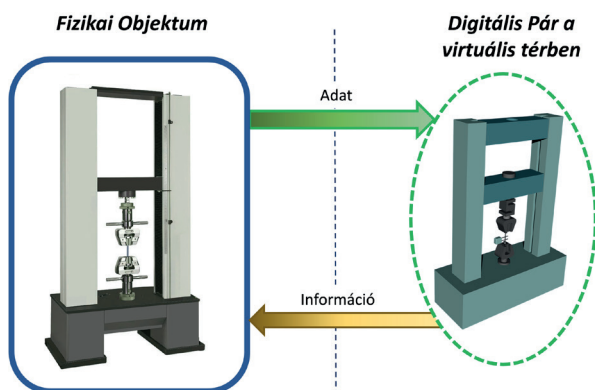
2. ábra: Egy anyagvizsgáló berendezés és annak fizikai ikerpárja

A *DP* koncepció alapjai 2002-ben Michael Grieves-nek a Michigan Egyetem Product Lifecycle Model (*PLM*, a termékek életciklus-modellje) Center alapításakor tartott előadása PowerPoint prezentációjában jelentek meg [52]. A koncepció akkor a *'Conceptual Ideal for PLM'* nevet kapta. A *PLM* modellt az 1980-as évek első felében az autóiiparban dolgozták ki. Azóta egyre elterjedtebben használják az ipar más területén is. A *PLM*-et azon praktikus igények

kielégítésére dolgozták ki, hogy segítségével menedzselni lehessen a mérnöki alkotások, termékek fejlesztése, gyártása, üzemeltetése és leszerelése során felmerült mindenféle kérdést, problémát. Grieves a *PLM* koncepciót úgy értelmezte, hogy a virtuális és a fizikailag megvalósított rendszer a teljes életciklus folyamán szorosan összekapcsolódik. A *DP* koncepció neve [53]-ban '*Mirrored Spaces Model*', [54] és [55]-ben '*Information Mirroring Model*', ám utóbbiban megjelenik a '*Digital Twin*' megjelölés is. Grieves 2012 óta megjelent publikációiban már kizárólag a '*Digital Twin*' megnevezést használja – pl. [56-59] –. A *DP* fogalma a *PLM* infrastruktúráján fejlődött ki. Egy termék életének követése és menedzselése az 1980-as évek közepére vált megvalósíthatóvá, amikor a megfelelő információgyűjtő, -feldolgozó és -tároló infrastruktúra már működőképes és elérhető volt. A *DP* koncepció kialakulásához az információtechnológia további fejlődésére volt szükség. A *DP* koncepció kialakulása folyamatosan visszahat a *PLM* koncepció fejlődésére. Fokozódik a realiztikusabb modellek iránti igény [60], amit a *DP* következő generációs modelljeiben már elvárásként fogalmazznak meg. Az Ipar 4.0, illetve a következő generációs Ipar-modell támogatása [61], valamint a *DP* és a *PLM* fogalmának kapcsolata [62] még mindig aktuális kutatási terület. A *DP* fogalmára [63]-ban 'holisztikus definíciót' javasolnak. Grieves a legutóbbi időben megjelent publikációjában áttekintette a *DP* eddigi történetét, és a koncepció egészségügybe történő kiterjesztésének lehetőségét vázolja [64].

A *DP* koncepció lényegéhez tartozik, hogy a Fizikai Objektum (*FO*) és annak *DP*-ja, a Virtuális Objektum (*VO*) között zárt hurkot képező információs Csatolás (*Csat*) létezzon. Az információs csatoláson keresztül gyűjtjük be a *FO*-ról a megfelelő adatok (*Adat*), amelyeket a virtuális térben a *DP* segítségével feldolgozunk, elemzünk, értékelünk, majd az értékelés eredményeként előállított információt (*Info*) visszacsatoljuk a fizikai objektumra. Ezt a koncepciót a szakirodalomban a *DP* háromdimenziós modelljének nevezik [50]. Szakítóvizsgálat háromdimenziós *DP* modelljét mutatjuk be a 3. ábrán.

Amint fent már említettük, a *DP* létrehozásának az a célja, hogy fizikai objektumok adott célnak megfelelő kialakítását, vagy működésének ellenőrzését adekvát modelleken végzett vizsgálatokkal támogatni lehessen. A *DP* kiváló konceptuális környezet arra, hogy komplex fizikai



3. ábra: Egy fizikai objektum (anyagvizsgáló gép a próbatesttel) és Digitális Párjának kapcsolata

objektumok (pl. komplex technológiai rendszerek) viselkedésének tanulmányozására platformként használjuk. A *DP* által nyújtott információk mennyisége és minősége attól függ, hogy a *VO* milyen felbontású és komplexitású fizikai modellt tartalmaz. Az utóbbi években több publikációban foglalkoztak azzal a kérdéssel, hogy a *DP*-ban implementált modelleket a mérnöki közelítésekénél finomabb, olyan „valódi fizikai modellekre” érdemes alapozni, amelyek egy rendszernek akár több fizikai mezőt leíró, többszálás modelljei lehetnek [65, 66].

Az anyagvizsgálati mérésekre rátérve, az elmondottak alapján a következő konklúzióra juthatunk. A *Szerkezetintegritási Számítások* [1]-ben tárgyalt módszertana komplex fizikai modellen alapul. A módszertanra alapozott alkalmazásokhoz a szabványosnál finomabb mérésekre és olyan mérés-kiértékelési eljárásokra lesz szükség, amelynek alapja a módszertanban vázolt elmélet. Ennek megvalósítására egy olyan *Digitális Pár* platform tűnik a legalkalmasabbnak, amelybe a *Szerkezetintegritási Számítások* módszertanának elméletét implementálták.

### 3.3 Az anyagtudományi mérések és kiértékelésük fizikai alapú konceptuális modellje

A *Szerkezetintegritási Számítások* módszertanának részletgazdagabb, komplexebb elméleti modelljei a kísérletektől is részletekben gazdagabb információ-tömeget igényelnek, hogy az elméletet validálni, majd a szükséges és elégséges validáció birtokában prediktív célú számításokra alkalmazni is lehessen. Ezért az *elmélet és a mérések viszonyát* is tárgyaló – az 1. ábrán bemutatott – konceptuális modellt átalakítottuk. Az átalakítás célja az, hogy az új konceptuális modell foglalja össze, és ábrázolja mindazokat a releváns szempontokat és tennivalókat, amelyek minden mérési feladatban közősek. A konceptuális modell kidolgozása során figyelembe vettük, hogy: (1) a mérés sokkal összetettebb folyamat, mint ahogy azt a metrológiai alapú modell reprezentálja; (2) a mérés konceptuális modelljét sokkal könnyebb átlátni, ha azt a belső szerkezetet is láttatni engedő, „*átlátszó doboz*” modell (az angol „*white box*” kifejezés tükörfordítását nem tartjuk szerencsésnek) szellemében, a szükséges mértékben részletezzük [24].

A modellben a Mérést a mérés előkészítése (*Előkészítés*), a mérés végrehajtása (*Mérés*) és a mérés nyers eredményeinek értékelése (*Feldolgozás*) fázisokra osztottuk. Ezért a mérés metrológiai modelljében alkalmazott ( $X \xrightarrow{\text{Mérés}} Y$ ) szimbolikus leképezést az ugyancsak szimbolikus ( $X \xrightarrow{\text{Előkészítés}} MO_{\text{Kezd}} \xrightarrow{\text{Mérés}} MO_{\text{Vég}} \xrightarrow{\text{Feldolgozás}} Y$ ) összetett leképezéssel helyettesítettük. A modell ilyen formában történő ábrázolását azok a tapasztalatok indokolják, hogy még a megfelelő szabványok előírásainak szigorú betartásával végrehajtott mérések eredményeit is érzékenyen befolyásolhatják olyan tényezők, amelyek a mérés előkészítése, végrehajtása és nyers eredményeinek a feldolgozása során felléphetnek, ám ezeket a metrológiai modell elrejtje a „külső megfigyelők” elől. Különösen igaz ez a mérések információszerzéssel és információfeldolgozással, valamint az információk transzformációjával

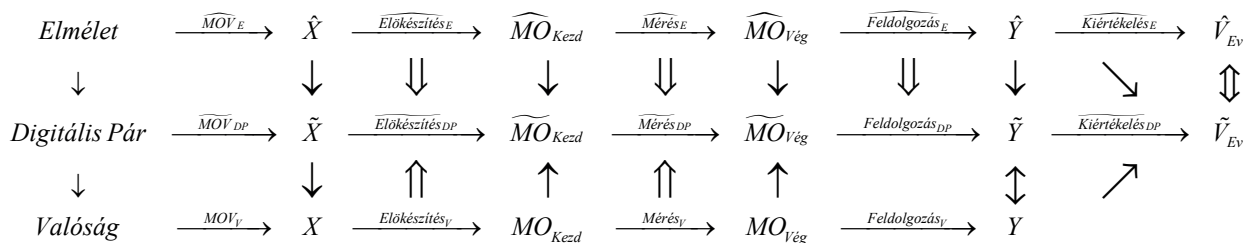
kapcsolatos aspektusára.

A konceptuális modell megalkotásához támaszkodtunk Urbanski és Samsonowicz publikációira – [67], [68] – is, és azokat az anyagvizsgálatok speciális környezetéhez szabtuk. Így az anyagvizsgálatok – a *Szerkezetintegritási Számítások* módszertanának igényeihez igazított – koncepciója a következők megfontolásából indul ki:

1. A roncsolásos anyagvizsgálatok speciális körülmények között *'lejátszott'* fizikai folyamatok, amelyek a *mérőkészülék* – valamilyen anyagvizsgáló berendezés – és a vizsgált *mintadarab* mérés során indukált kölcsönhatásaiból származnak. A mérés során a megfigyeléseket megfelelő *szenzorok* végzik. A megfigyelésekhez olyan jellegű és annyi szenzort alkalmazunk, amennyi képes a kiértékeléshez elégséges, ésszerű mennyiségű, értékelhető információt szolgáltatni, valamint technikailag elérhető (ezen a szinten egyszerűen szenzornak tekintjük pl. a nyúlásmérőt és az optikai kamerát is).
2. A *mérési elrendezést a megfigyelni kívánt fizikai folyamatok elméleti modellje alapján úgy tervezzük meg*, hogy azok a kiértékeléshez elégséges, ésszerű mennyiségű, értékelhető információt szolgáltatassanak, és az adott vizsgálati program keretei között megvalósíthatók legyenek. A tervek kimunkálása során kiemelt figyelmet fordítunk olyan információk gyűjtési eljárásainak kidolgozására és az ezekhez szükséges, szenzorokon alapuló infrastruktúra terveinek kidolgozására, amelyek a mérés során lehetővé teszik a próbatestre jellemző mintázatok időbeli fejlődésének követését. A tervezés során számolunk azzal a ténnyel, hogy a mintadarabok előkészítésének folyamata, illetve annak eredményei a mérés során indukált fizikai folyamatokat, ezen keresztül pedig a mérések eredményeit is érdemben befolyásolhatják. A mintadarabok előkészítése a mérési folyamat elválaszthatatlan része. A tervek tartalmazzák a mintadarab előkészítése során végzett megfigyeléseket, melynek során a későbbi kiértékeléshez elégséges, ésszerű mennyiségű információt megszerezünk.
3. A tervek alapján implementáljuk a mérési elrendezést.
4. A mérés során vizsgálatnak alávetett és megfigyelt mintadarabok – *MO*-k – előkészítése során minden darab gyártását a terv szerinti eljárással figyeljük meg; így a későbbi kiértékeléshez elégséges, ésszerű mennyiségű információ áll rendelkezésre a próbatestnek

a mérés megindítása pillanatában érvényes, kezdeti állapotáról.

5. Amérési elrendezésem minden *MO* vizsgálatát elvégezzük. Egy mérés során végig követjük azt a folyamatot, amelyen keresztül a mintadarab a kezdeti állapottól a végső állapotig eljut. A folyamatot a *mérőrendszer* vezérlő- és adatgyűjtő rendszere képességeinek megfelelő – vezérlési és jelvételezési – időskála választásával idődiszkrétte tesszük, az idő  $\Delta\tau$  kvantálásával. A mérőrendszer a folyamat során a megfelelő kontrolljelek alapján terheli a mintadarabot, melynek állapotát a megfelelő szenzorokon keresztül,  $\Delta\tau$  időpontként regisztráljuk. A szinkronizált információhalmazt rögzítjük/archiváljuk. Egy mérés „nyers eredményeit” a szenzorok jeleinek a – megfelelő transzformációkkal – további értékelésre alkalmas formába alakított eredményei jelentik. A nyers eredményeknél feltételezzük, hogy a rendszer megfelelően kalibrált. A mérőkészülék jeltranszformációs rendszere a nyers eredmények egy részét valós időben szolgáltatja, míg másik részét utófeldolgozás formájában, offline módban értékeljük ki.
6. Egy *MO* mérésének *eredményeit* a „nyers” eredmények alapján, a mérőrendszer adekvát modelljén, a mintadarab adekvát pontosságú *3D* geometriai modelljére és a megfigyeléssel követett *folyamatok elméleti fizikai modelljére épített szimulációkkal* állítjuk elő. A „nyers” eredmények egyik része, a mérőrendszer viselkedését szabályozó vezérlő paraméterek, a szimulációkhoz szükséges időfüggő bemenetet szolgáltatják. A másik rész – a szimulációkkal meghatározott és a megfigyelt eredmények összehasonlításán keresztül – az elméleti modell és paramétereinek verifikálására szolgál. Az elméleti modell – a paramétereivel együtt – akkor tekinthető verifikáltnak, ha az elemzések és a mérés eredményeit összevetve, azok egy megfelelően megválasztott kritérium szerint „*megfelelően illeszkednek*”. Minden próbatest mérését a *DP*-n végzett szimulációk segítségével értékelünk ki.
7. Egy mérés *kiértékelt eredményeinek* azok az eredmények tekinthetők, amelyek a szimulációkkal meghatározott eredmények halmazából a legjobban illeszkednek a mérések nyers eredményeihez, vagy a mérések nyers eredményeihez legjobban illeszkedő szimulációk eredményeiből lettek leszármaztatva.
8. Egy mérési sorozat akkor tekinthető kiértékeltnek, ha



ahol

$$Mérés_V : \left\{ Mérés_V(\tau_i, \tau_{i+1}) : MO(\tau_i) \xrightarrow{Külső\ Teher(\tau_i, \tau_{i+1})} MO(\tau_{i+1}) \longrightarrow \dot{Érték}_{Prim}(\tau_{i+1}) | \tau_{i+1} : \tau_i + \Delta\tau_i, i : Kezd \dots Vég \right\}$$

4. ábra: A fizikai elmélet, a mérések és a Digitális Pár konceptuális sémája



a DP-n végzett szimulációk segítségével a sorozat minden egyes mérését egyenként kiértékeltek és az egyes mérések kiértékelte eredményeinek halmazát adekvát statisztikai módszerekkel tovább értékelték.

Az új konceptuális modell diagramját a 4. ábrán mutatjuk be.

A diagramon az *Elmélet* azt az elméleti fizikai keretrendszert fejezi ki, amely meghatározza, hogy mely fizikai mennyiségre vagyunk kíváncsiak; az *Elmélet* a mérések előkészítésének, végrehajtásának és az eredmények értelmezésének módszertanát egyaránt megalapozza. A *Valóság* reprezentálja a külső világot, ahol a folyamatok valójában zajlanak; a *Digitális Pár* a mérések DP-ját szimbolizálja. *Digitális Pár* az *Elmélet* és a *Valóság* közötti rétegben helyezkedik el, mert az *Elmélet* rétegben kidolgozott elmélet konkrét mérési esetekre vonatkozó megoldásait a *Digitális Párban* implementált geometriai modelleken, numerikus eljárásokra alapozott szimulációkkal állítjuk elő. Az *Elmélet*  $\longrightarrow$  *Digitális Pár*  $\longrightarrow$  *Valóság* leképezés-láncolat azt fejezi ki, hogy az *anyagvizsgálatok* típusát az *elmélet* határozza meg, ám a konkrét esetek elméleti vizsgálatát – pl. egy *MO* geometriájának fejlesztését – a *Digitális Pár* rétegben végzett elemzések segítségével végezzük el. Az  $MOV_L$ -el ( $L=T, DT, R$ ) jelölt nyílak azt szimbolizálják, hogy az adott típusú méréshez a megfelelő típusú *MO*-t kell megválasztani. Az *Elmélet*-ben  $\overline{MOV}_E$  azt szimbolizálja, hogy az adott típusú mérési objektum elméleti modelljét meg kell alkotni;  $MOV_V$  a *Valóság* térben azt jelenti, hogy az objektumot a mérésre elő kell készíteni;  $\overline{MOV}_{DP}$  a *Digitális Párban* azt jelenti, hogy az objektum elemzésekre alkalmas informatikai modelljét ki kell dolgozni.  $\hat{X}$ ,  $\tilde{X}$  és  $X$  a vizsgált objektum lehetséges állapotainak,  $\hat{Y}$ ,  $\tilde{Y}$  és  $Y$  pedig az aktuális mérési eredményeinek halmazát írja le az *Elmélet*, a *Digitális Pár*, illetve a *Valóság* rétegben. Az  $\hat{X} \longrightarrow \tilde{X} \longrightarrow X$  lánc azt fejezi ki, hogy az elmélet ( $\hat{X}$ ) szabja meg, hogy a *Valóságban* ( $X$ ) a megfigyeléseket milyen körülmények között kell végrehajtani; a körülmények részleteit a *Digitális Pár* segítségével ( $\tilde{X}$ )-ben dolgozzuk ki. Az egyes mintadarabok mérésre történő előkészítését az *Előkészítés*:  $X \longrightarrow MO_{Kezd}$  leképezések írják le: az *Elméletben*  $\overline{Előkészítés}_E$ :  $\hat{X} \longrightarrow \overline{MO}_{Kezd}$  azt jelenti, hogy a mintadarab előkészítését elméleti megfontolások használatával meg kell tervezni; az elméleti megfontolásokat a *Digitális Párban* implementálni kell, ahol a folyamatot  $\overline{Előkészítés}_{DP}$ :  $\tilde{X} \longrightarrow \overline{MO}_{Kezd}$  írja le; a *Valóság* rétegben megvalósított előkészítést  $\overline{Előkészítés}_V$ :  $X \longrightarrow MO_{Kezd}$  szimbolizálja. Az  $\overline{Előkészítés}_E \Rightarrow \overline{Előkészítés}_{DP}$  nyíl reprezentálja, hogy az *Elméletben* meghatározott előkészítési procedúrát a *Digitális Párban* adekvátan kell implementálni. Az  $\overline{Előkészítés}_V \Rightarrow \overline{Előkészítés}_{DP}$  nyíl arra utal, hogy a megvalósított előkészítési procedúráról a *Digitális Párba* olyan információt kell szolgáltatni, amely a folyamat adekvát modellezését teszi lehetővé. Az egyes mintadarabokon végrehajtott mérési folyamatot *Mérés*:  $MO_{Kezd} \longrightarrow MO_{Vég}$  reprezentálja. *Mérés* azt fejezi ki, hogy a mérési folyamat során a próbatest a kezdeti állapotból a végállapotba megy át. A folyamatot az *Elméletben*  $\overline{Mérés}_E$ :  $\overline{MO}_{Kezd} \longrightarrow \overline{MO}_{Vég}$  ábrázolja, amelyet a *Digitális Párban* a  $\overline{Mérés}_{DP}$ :  $\overline{MO}_{Kezd} \longrightarrow \overline{MO}_{Vég}$  fejez ki. A

*Valóságban* a mérési folyamatot  $\overline{Mérés}_V$ :  $MO_{Kezd} \longrightarrow MO_{Vég}$  szemlélteti, melynek belső szerkezetét a diagram alján külön kiemeltük.  $\overline{Mérés}_V$  diagramon kiemelt, komplex szerkezete a fenti lista 5. pontjában leírtakat jeleníti meg. A  $\overline{Mérés}_E \Rightarrow \overline{Mérés}_{DP}$  nyíl azt reprezentálja, hogy az *Elméletben* elméleti eszközökkel megfogalmazott mérési folyamatot a *Digitális Párban* úgy kell implementálni, hogy a szimulációk valóságghűen kövessék a folyamatot. A  $\overline{Mérés}_V \Rightarrow \overline{Mérés}_{DP}$  nyíl azt fejezi ki, hogy a mérésről a *Digitális Párba* olyan információkat kell szolgáltatni, amely a virtuális térben a mérési folyamat megkívánt pontosságú követését teszi lehetővé. A *Feldolgozás*:  $MO_{Vég} \longrightarrow Y$  leképezés a kiértékelés folyamatát reprezentálja. A megfigyelni kívánt fizikai folyamatok elméleti modelljei alapján tervezzük meg az *Elméletben* az adatok feldolgozásának/értékelésének módszertani alapjait; ezt fejezi ki az  $\overline{Feldolgozás}_E$ :  $\overline{MO}_{Vég} \longrightarrow \hat{Y}$  leképezés, amelyet a *Digitális Párban*  $\overline{Feldolgozás}_{DP}$ :  $\overline{MO}_{Vég} \longrightarrow \tilde{Y}$  valósít meg. A  $\overline{Feldolgozás}_E \Rightarrow \overline{Feldolgozás}_{DP}$  nyíl azt fejezi ki, hogy az *Elméletben* elméleti eszközökkel megfogalmazott kiértékelési folyamatot a *Digitális Párban* úgy kell implementálni, hogy a számítások az elméleti sémát valóságghűen kövessék. A *Valóság* rétegben a  $\overline{Feldolgozás}_V$ :  $MO_{Vég} \longrightarrow Y$  eljárás a nyers mérési adatok olyan feldolgozását jelenti, melynek releváns eredményei a *Digitális Párban* végrehajtott szimulációk megfelelő eredményeivel összevetethetők lesznek. Az  $Y \longleftarrow \tilde{Y}$  nyíllal fejezzük ki, hogy a kiértékelés során a kísérletek és a szimulációk megfelelő eredményeit összehasonlítjuk. A *Kiértékelés*:  $Y \longrightarrow V_{Ev}$  leképezés az indirekt úton meghatározható fizikai mennyiségek kiértékelésének folyamatát írja le. Az *Elméletben*  $\overline{Kiértékelés}_E$ :  $\hat{Y} \longrightarrow \hat{V}_{Ev}$  a kiértékelés elvi sémáját, míg a *Digitális Párban*  $\overline{Kiértékelés}_{DP}$ :  $\tilde{Y} \longrightarrow \tilde{V}_{Ev}$  a konkrét számításokat reprezentálja.

Összefoglalva, a diagramon bemutatott konceptuális séma azt fejezi ki, hogy: (1) a mérést összetett elméleti és gyakorlati előkészítő munkák előzik meg; (2) a mérés részét képezik az előkészítő munkák is, amelyekről minden olyan releváns információt javasolt begyűjteni, amely a mérések értékelésében szerepet játszhat; (3) a mérési folyamatot a *Digitális Párba* implementált elméleti modellen követjük; (4) a mérés értékelése a *Digitális Párban* végzett szimulációk és a mérések megfelelő eredményeinek összehasonlításával történik; (5) az indirekt módszerekkel meghatározható fizikai mennyiségeket az elmélet alapján, a *Digitális Párban* végzett számításokkal határozzuk meg.

#### 4. Összefoglalás

Tanulmányunk anyagvizsgálatok és kiértékelésük általános módszertani kérdéseivel foglalkozott. Elsőként az anyagvizsgálati mérések felhasználási környezetének, a *Szerkezetintegritási Számítások* korszerű módszertanának néhány olyan tulajdonságát vázoltuk, amelyek megindokolják az anyagvizsgálatok módszertanának a Számítások módszertanához történő igazítását. Ismertettük az anyagtudományi mérések metrológiai alapú modelljét. Ezt követően az anyagtudományi vizsgálatok és kiértékelésük fizikai alapú konceptuális modelljét mutattuk

be. A modell arra épül, hogy a roncsolásos anyagvizsgálatok speciális körülmények között 'lejátsszot' fizikai folyamatok. A Szerkezetintegritási Számítások új módszertana egy, a modern kontinuum termodinamikából levezetett törésmechanikai elméleten alapul, amely átfogóbb, komplexebb a klasszikus modelleknél. Ezért az elmélet validálásához és az alkalmazások számára szükséges konstitutív paraméterek meghatározásához komplexebb, a mai anyagvizsgáló szabványokon túlmutató vizsgálati és kiértékelési módszertan szükséges.

A bemutatott konceptuális modell egységes rendszerbe foglalja az anyagvizsgáló mérések megoldásában közös szempontokat és tevékenységeket. Egységes rendszernek fogja fel az (*Elmélet, Digitális Pár, Valóság*) hármast. Az *Elméletben* a fizikai folyamatokat a későbbi alkalmazás céljainak megfelelő elméleti fizikai modell írja le. A mérési elrendezést az elméleti modell alapján tervezik meg és a méréseket úgy hajtják végre, hogy azok eredményei az elméleti modell által előírt jellemzők meghatározásához elégséges, ésszerű mennyiségű és értékelhető információt szolgáltatassanak. A mérések kiértékelését az elméleti fizikai modell alapján megtervezett és a megfelelő *IT* rendszeren implementált *Digitális Pár* segítségével végzik. A koncepció szakítóvizsgálatokra történő gyakorlati alkalmazhatóságát bizonyítottuk; a bizonyítás részleteit e lapszám következő tanulmányában [69] mutatjuk be.

## Irodalomjegyzék

- [1] Fekete T., Nagyméretű nyomástartó rendszerek Szerkezetintegritási kérdéseiről, (2023) Anyagvizsgálók Lapja, 2023/III. lapszám, 22-27.
- [2] T. Nireki, Service life design, Construction and Building Materials 10 5 (1996) 403–406. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00045-3](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00045-3)
- [3] ASME 2023, Boiler and Pressure Vessel Code Complete Set. ASME New York (2023)
- [4] RCCM 2022, Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands, AFCEN Courbevoie (2022)
- [5] KTA Program of Standards, KTA Salzgjitter (2023) [https://www.kta-gs.de/common/regel\\_prog1.htm](https://www.kta-gs.de/common/regel_prog1.htm)
- [6] VDI, VDI Standards, Beuth Berlin (2023) <https://www.vdi.eu/engineering/vdi-standards/>
- [7] PNAE G-7-002-86, Equipment and pipelines strength analysis norms for nuclear power plants, Energoatomizdat Moscow (1989) (In Russian)
- [8] RD EO 1.1.2.99.0920–2014, Brittle Fracture Resistance Calculations of Water-Water Reactor Pressure Vessels at the Design Stage. Methodology, Rosenergoatom Moscow (2014)
- [9] IAEA, Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants Revision, 1 IAEA-EBP-WWER-08(1), IAEA Vienna (2006)
- [10] Kang, K.S., Kupča, L. (eds.) Pressurized Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment, Handbook on Deterministic Evaluation for the Integrity of Reactor Pressure Vessel, IAEA TECDOC-1627, IAEA Vienna (2010)
- [11] VERLIFE, Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs, VERLIFE – Version 2008, COVERS Project Report, European Commission Bruxelles (2008)
- [12] M.A.Q. Siddiqui, K. Regenauer-Lieb, H. Roshan, Thermo-Hydro-Chemo-Mechanical (THCM) Continuum Modeling of Subsurface Rocks: A Focus on Thermodynamics-Based Constitutive Models, Applied Mechanics Review (2024) 76 031001. <https://doi.org/10.1115/1.4056726>
- [13] ISO 6892-1, Metallic materials – Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature, ISO Geneva (2019)
- [14] ISO 6892-2, Metallic materials – Tensile testing: Part 2: Method of test at elevated temperature, ISO Geneva (2018)
- [15] ISO 6892-3, Metallic materials – Tensile testing: Part 3: Method of test at low temperature, ISO Geneva (2015)
- [16] ASTM E8/E8M-22, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [17] ISO 12135, Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness, ISO Geneva (2021)
- [18] ASTM E 399-22, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [19] ASTM E 1820-23, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International West Conshohocken (2023)
- [20] ASTM E 1921-22, Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T<sub>0</sub>, for Ferritic Steels in the Transition Range, ASTM International West Conshohocken (2022)
- [21] Z.P. Bažant, L. Cedolin, Stability of Structures Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories, Oxford University Press, New York Oxford (1991)
- [22] L. Mari, Notes towards a qualitative analysis of information measurement results, Measurement 25 (3) (1999) 183–192. [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(99\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(99)00002-0)
- [23] L. Finkelstein, Theory and Philosophy of Measurement, In: P.H. Sydenham (Ed.), Handbook of Measurement Sciences, Vol. 1, Wiley New York (1982) 1–30.
- [24] L. Mari, M. Wilson, A. Maul, Measurement Across the Sciences, Developing a Shared Concept System for Measurement. 2nd Edition, Springer Series in Measurement Science and Technology, Springer Cham (2023) <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22448-5>
- [25] G.C. Sih, Experimental fracture mechanics: strain energy density criterion. In: G.C. Sih, Mechanics of Fracture Initiation and Propagation, Chapter 8. Engineering Applications of Fracture Mechanics Vol 11. (1991) Springer Dordrecht [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3734-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3734-8_8)
- [26] P. Zheng, R. Chen, H. Liu, J. Chen, Z. Zhang, X. Liu, Y. Shen, On the standards and practices for miniaturized tensile test – A review, Fusion Engineering and Design 161 (2020) 112006. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112006>
- [27] Szilárd L., Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen, Z. Physik 53, (1929) 840–856. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01341281>
- [28] Gábor D., Communication theory and physics, Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory 1:1 (1953) 48–59. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1188558>
- [29] L. Brillouin, Science and Information Theory, Academic Press New York (1956)
- [30] R.Z. Morawski, An application-oriented mathematical meta-model of measurement, Measurement (2013) 46 3753–3765. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.004>
- [31] L. Mari, P. Carbone, A. Giordani, D. Petri, A structural interpretation of measurement and some related epistemological issues, Studies in History and Philosophy of Science Part A (2017) 65–66 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2017.08.001>

- [32] A. Giordani, L. Mari, A structural model of direct measurement, *Measurement* (2019) 145 535–550. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.060>
- [33] Wiener, N.: *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press, Cambridge, MA. (1948)
- [34] Johnson, B. D.: *The Cybernetics of Society, The Governance of Self and Civilization*. (1998) <https://jurlandia.org/cybsoc/>, utolsó hozzáférés: 2023. 10. 27.
- [35] Ampère, A. M.: *Essai sur la philosophie des sciences; Exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines*, 2. rész, Bachelier, Paris. (1843)
- [36] Umpleby, S.: *Definitions of Cybernetics*. <https://asc-cybernetics.org/definitions/>, (2000) utolsó hozzáférés: 2023. 10. 27.
- [37] A.L. Fradkov, *Кибернетическая физика*. Наука, Санкт-Петербург, (2003)
- [38] A.L. Fradkov, *Cybernetical physics: from control of chaos to quantum control*. Springer, Berlin. (2007) <https://doi.org/10.1007/978-3-540-46277-4>
- [39] A.L. Fradkov, Exploring nonlinearity by feedback. *Physica D* 128 159–168. (1999) DOI: [https://10.1016/S0167-2789\(98\)00322-4](https://10.1016/S0167-2789(98)00322-4)
- [40] A.L. Fradkov, I.V. Miroshnik, V.O.Nikiforov, *Nonlinear and adaptive control of complex systems*. Hingham, Massachusetts, Kluwer Academic Publishers (1999)
- [41] A.L. Fradkov, Application of cybernetic methods in physics, *Physics – Uspekhi*, 48 2 (2005) 103–127. <https://doi.org/10.1070/pu2005v048n02abeh002047>
- [42] A.L. Fradkov, Horizons of cybernetical physics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 375 (2017) 20160223. <https://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0223>
- [43] Khantuleva, T. A., Shalymov, D. S.: Modelling non-equilibrium thermodynamic systems from the speed-gradient principle. *Phil. Trans. R. Soc. A* 375 (2017) 0160220. <https://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0220>
- [44] NSF Program: Cyber-Physical Systems (2021), <https://www.nsf.gov/pubs/2021/nsf21551/nsf21551.pdf> letöltve: 2023. 10. 27.
- [45] Acatech: *Cyber-Physical Systems: Driving force for innovation in mobility, health, energy and production*. Acatech Position Paper, December 2011, Acatech (2011)
- [46] Geisberger, E., Broy, M (Eds.): *Living in a networked world. Integrated research agenda Cyber-Physical Systems (agendaCPS)*. Acatech Study, March 2015, Acatech (2015)
- [47] Jasperneite, J.: Was hinter Begriffen wie Industrie 4.0 steckt. (2012) <https://www.computer-automation.de/steuerungsebene/steuernregeln/was-hinter-begriffen-wie-industrie-4-0-steckt.93559.html>, letöltve: 2021. november 12.
- [48] Monostori, L.: Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges, *Variety Management in Manufacturing*. Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, *Procedia CIRP* 17 (2014) 9 – 13.
- [49] Åström, K. J., Kumar, P. R.: Control: A perspective, *Automatica* 50 (2014) 3–43. <https://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2013.10.012>
- [50] F. Tao, M. Zhang, A.Y.C. Nee, Background and Concept of Digital Twin. In: F. Tao, M. Zhang, A.Y.C. Nee, (Eds.) *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, Academic Press New York (2019) 3–28.
- [51] S. Ferguson, Apollo 13: The First Digital Twin, *Simcenter Siemens* (2020) <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>
- [52] M. Grieves, PLM Initiatives [PP. Slides]. Paper presented at the Product Lifecycle Management Special Meeting, University of Michigan Lurie Engineering Center, (December 3, 2002). (2002)
- [53] M. Grieves, Product Lifecycle Management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2 1–2 (2005) 71–84.
- [54] M. Grieves, *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking*. New York: McGraw-Hill. (2006)
- [55] M. Grieves, *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management*. Space Coast Press, Cocoa Beach, FL. (2011)
- [56] M. Grieves, *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*, White paper (2014) <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf> hozzáférés: 2023. 10. 23.
- [57] M. Grieves, *Virtual Factory Replication*. *Efficient Manufacturing*, 6 5 (2015)
- [58] Grieves, M.: *White Paper: Driving Digital Continuity in Manufacturing*. (2017) <http://research3.fit.edu/camid/research.php> hozzáférés: 2023. 10. 25.
- [59] M. Grieves, *Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins*. In: Flumerfelt, S. és mások (Szerk.): *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. (2019) 175-200.
- [60] S. Boschert, R. Rosen, C. Heinrich, Next Generation Digital Twin. In: Horváth, I., Suarez Riviero, J.P., Hernandez Castellano, P.M. (szerk.): *Proceedings of the 12th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2018*, Delft University of Technology. (2018) 209–218.
- [61] P. Chiabert, A. Bouras, F. Noël, J. Ríos, (Szerk.) *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2 – 4, 2018, Proceedings*, Springer International Publishing (2018)
- [62] C. Fortin, L. Rivest, A. Bernard, A. Bouras, (Szerk.) *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era 16th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2019, Moscow, Russia, July 8 – 12, 2019, Revised Selected Papers*, Springer International Publishing. (2019)
- [63] M. Eigner, A. Detzner, P. Heiner Schmidt, R. Tharma, Holistic definition of the digital twin, *International Journal of Product Lifecycle Management*, 13 4 (2021) 343–357.
- [64] M.W. Grieves, Digital Twins: Past, Present, and Future. In: N. Crespi, A.T. Drobot, R. Minerva, (Eds.) *The Digital Twin*. Springer Cham (2023) [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4)
- [65] J. Post, M. Groen, G. Klaseboer, Physical Model-based Digital Twins in Manufacturing Processes. Paper presented at the Forming Technology Forum 2017, Enschede, The Netherlands. (2017)
- [66] J., Rios, N. Bolander, Physics in a Digital Twin World. In: N. Crespi, A.T. Drobot, R. Minerva, (Eds.) *The Digital Twin*. Springer Cham (2023) [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_21)
- [67] M.K. Urbanski, J. Samsonowicz, Topological properties of electromagnetic measurement. In: *Proceedings of the XVI. IMEKO Word Congress, Vienna, Vol. V. (2000)* 183–186.
- [68] M.K. Urbanski, J. Samsonowicz, On the field nature of measuring process, *Measurement* 34 (2003) 31–38. [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(03\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(03)00017-4)
- [69] Fekete T., Antók D., Tatár ., Bereczki P., Szakítóvizsgálatok innovatív kiértékelési módszertanáról, (2023) *Anyagvizsgálók Lapja*, 2023/III. lapszám, 39-54.