

KÖLTSÉGOPTIMÁLT GÉPÉSZETI TERVEZÉSI MÓDSZEREK

COST-OPTIMIZED MECHANICAL DESIGN METHODS

Szűcs Renáta*, Dr. Jármai, Károly**

ABSTRACT

Cost-optimized design is becoming more and more important among the design requirements. The competitiveness of companies highly depends on their cost-optimized design. The cost of a product can be reduced significantly in the design phase, cc. 70% of the expenses decided in the design phase. Therefore, during the design process, special attention should be paid to the production costs incurred. In the present study, the authors deal with presenting the available cost optimization design tools that can be used in the planning phase and the possible development of these tools.

1. BEVEZETÉS

A vállalatok versenyképessége több tényezőből áll, azonban ezen tényezők közül kiemelkedőek az ár jellegű tényezők, azon belül is azon tényező, hogy egy adott terméket a konkurensoktól alacsonyabb áron tudják-e értékesíteni. Ezen tényező érvényesítésében pedig a tervezők jelentős ráhatással bírnak. A gépészeti tervezés során a tervezők az előzetes költség minimálást, optimalást, az egyes megoldási koncepciók költségvonzatának elemzését általában véve nagyvonalúan kezelik. Azonban egy új termék tervezésénél a költségek elemzése legalább olyan fontos a termék későbbi sikeressége szempontjából, mint a műszaki teljesítőképesség. Ez alapján a költségre, mint kritikus tervezési paraméterre kell tekinteni. A tervezés során nem kizárólagosan műszakilag megfelelő, hanem gazdaságilag is életképes terméket kell létrehozni.

A tervezők az egyes megoldás variációk kiválasztása során a költséget, mint kiválasztási kritériumot általában ugyan figyelembe veszik, azonban legtöbb esetben inkább szubjektív megítélés alapján, mely tényleges, megbízható költségelemzésekkel nincs alátámasztva. A nem megbízható költségelemzés nem csak az előzetesen becsült költségek növekedését okozhatja, hanem időbeli veszteségeket is okozhat. Ilyen időbeli veszteség lehet a tervezési idő elhúzódnása (pl. a szükségessé váló áttervezések miatt), vagy a piacra jutás tervezett időpontjának elhúzódnása. Ezen időbeli elcsúszások szintén költségekkel, illetve presztízsvesztéssel is járhatnak, mind a tervező, mind pedig a vállalat szempontjából. Magyarországon, de valójában a világon

kevés valós, jól használható eszköz áll a tervezők rendelkezésére, hogy a tervezés korai szakaszában a költségeket, mint tervezési paramétert, kiválasztási kritériumot helyesen, megalapozottan tudják figyelembe venni. Az irodalomban fellelhető költségbecslési módszerek többsége mérnöki szempontból nehezen alkalmazhatók, a hagyományos technikák, mint például az össztömeg minimálása, pedig sok esetben nem valós költségoptimumot eredményez. A tervezés során sok esetben úgynevezett intuitív módszert alkalmaznak, mely egy tapasztalatokra hagyatkozó módszer, melynek megbízhatósága nagyban a tervező felkészültségén és korábbi tapasztalatain múlik, így kevés tapasztalattal rendelkező, esetleg pályakezdő mérnököktől nem elvárható, hogy valós eredményeket tudjanak elérni a módszer alkalmazásával [1].

Jelen tanulmányban röviden összegzésre kerülnek az irodalomban elérhető módszerek, rámutatva azok gyenge pontjaira, valamint előrevetítve egy mérnöki szempontból is jól használható módszer kidolgozási lehetőségét.

2. KÖLTSÉGBECSLÉSI MÓDSZEREK

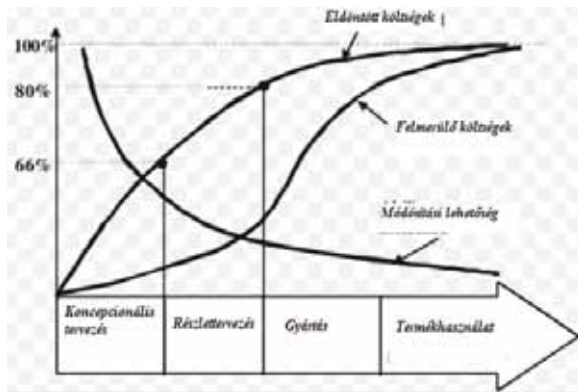
2.1. A költségbecslés jelentősége

A termék teljes életciklus költségének több, mint 70%-a a korai tervezési fázisban eldől, ebben a tervezők, gyártók többsége egyetért, valamint a szakirodalom is kimutatta [2, 3, 4, 5, 6]. A költségeknek a korai tervezési fázisban betöltött jelentős szerepét már a 80-as években felismerték, és ez a felismerés vezetett több tervezési módszertan kidolgozásához [7]. Ilyen módszertanok a DFA, DFM stb. Ezen módszerek többnyire sikeresnek bizonyultak a költségek csökkentésében, azonban ezen módszerek esetén a költség nem, mint kritikus tervezési paraméter jelenik meg. A tervezők számára a költségbecsléshez több költségbecslési technika áll rendelkezésre, azonban azok nem feltétlenül alkalmazhatóak a koncepcionális tervezési fázisban [6]. A termék életciklusa és a termék költsége közötti összefüggés az 1. ábrán látható. A diagram alapján láthatjuk a költségek döntő többsége már a koncepcionális tervezési fázisban eldől, a fennmaradó része pedig a részlettervezés során allokálódik. A gyártás során már a költségek nagyon kis mozgási térben

* ügyvezető, vezető tervező, S&G Solution Kft. 3508 Miskolc, Haladás u. 5.

** egyetemi tanár, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Miskolci Egyetem, 3515 Miskolc, Egyetemváros

módosíthatóak, a felmerülő módosítási igények, pedig magas költségvonzattal járnak. Ha a felmerült költségeket tekintjük, akkor a koncepcionális és a részlettervezési fázisban azok a teljes költségekhez képest minimálisak, 20% körül mozognak. A módosítási lehetőség a tervezés előrehaladtával folyamatosan csökken, a koncepcionális szakasz végére 50% köré csökken, míg a részlettervezés után 20 % körül mozog [6, 8]. Ezen tények tekintetében egyértelműen megállapítható, hogy a mérnöki gyakorlatban jól használható módszer kidolgozása jelentős versenyelőnyt jelent.



1. ábra Összefüggés a termék életciklusa és a termék költsége között [16]

2.2 Irodalmi áttekintés

Farineau et al. [9] szerint a költségbecslési technikák az alábbi négy kategóriába sorolhatóak: intuitív, analóg, parametrikus, analitikus. Roy [6] a költségbecsléseket az alábbi öt módszerre osztja: tradicionális, parametrikus, alaksajátosságon alapuló, tapasztalaton alapuló, neutrális hálózatok alapján. Niazi et al. [10] a költségbecsléseket kvalitatív és kvantitatív csoportokra osztja.

Látható, hogy különböző szerzők más-más felbontást alkalmaznak a technikák csoportosításához. Jelen tanulmányon belül a következő részben egy saját, azonban a szakirodalomra támaszkodó felbontásban kerülnek ismertetésre a különböző módszerek.

2.3 Költségbecslési technikák

2.3.1 Intuitív költségbecslés

Ezen módszer egy, a tapasztalatokra hagyatkozó módszer, melynek megbízhatósága nagyban annak készítőjének felkészültségén és korábbi tapasztalatain múlik. Az elkészítéséhez szükséges tapasztalat származhat közvetlenül a költségbecslő tudásából, vagy bizonyos tárolt adatformákból származtatott információkból, mint például szabályok, döntési fák és katalógusok, az alkatrészek és szerelvények költségbecslésének előállításához [10]. A technika

előnye, hogy egyszerű és gyors, azonban a megbízhatósága erőteljesen megkérdőjelezhető.

2.3.2 Paraméteres becslés

A termékfejlesztés, vagy koncepcionális tervezés korai szakaszában a termékköltségek becslésének széles körben alkalmazott módszerét parametrikus becslésnek (PE) nevezik. Ennek a koncepciónak a szemléltetésére az irodalomban található példa a repülőgépfelvezetés területén a tömegnek a gyártási költséggel kapcsolatos összefüggésének vizsgálata, mely szerint a repülőgépek súlyának növekedésével, annak gyártási költsége is növekszik [6]. A súly és a gyártási költség közötti kapcsolat között közel lineáris összefüggés van irodalmi adatok alapján [6]. Azonban ezen megállapítás nem terjeszthető ki általánosan. Tradicionálisan mindazonáltal jelenleg is elterjedt, hogy a tervezés során tömeg minimumra kell törekedni, ezáltal minimalva a gyártási költségeket. Ezen törekvés valójában sok esetben nem jelent költség optimumot. A tervezők számára jelenleg nem érhető el, olyan tervezési módszer, vagy katalógus, mely alapján már a tervezési fázisban hatékonyan a költség optimált tervezés alapján tudnák lefolytatni a tervezést.

Azonban a parametrikus módszer az egyik leghatékonyabb módszer lehetne a költséghatékony tervezés támogatásában, amennyiben megfelelő modellek állnának rendelkezésre a tervezők számára. Maga a módszer mérnöki szempontból rendkívül jól használható, amennyiben megfelelő modellek kerülnek felállításra. Alapos kutatómunka alapján lehetővé válik úgynevezett költségbecslési kapcsolatok (CER) felállításával parametrikus modellek létrehozása, melyek elemzett kapcsolatok, változók és konstansok alkalmazásával olyan alapszabályokat, feltételeket állítanak fel, mellyel az adott tervezési helyzet során az egyes variációk költség alapján történő elemzése megvalósulásra kerülhet. A CER egy matematikai kifejezés, ahol a költség a költségvezérlők (k) változóinak függvénye.

2.3.3 Alaksajátosságon alapuló költség számítás (FBC)

A CAD/CAM technológia, különösen a 3D modellező eszközök nagymértékű elterjedése jelentős hatással volt az alaksajátosságon alapuló költség számítás (FBC) fejlődésére. A kutatók a tervezés, a folyamattervezés és a gyártás integrációját vizsgálják költségelemzés szempontjából egy alaksajátosságon alapuló modellezési megközelítés alkalmazásával [11, 12, 13]. Az FBC technika egy jelenleg is kutatott módszer, mely teljes egészében még nem került kidolgozásra. A gyártási technológiát, időt, költséget az egyes alkatrészekben lévő alaksajátosságok jelentősen befolyásolják, így ezen

költségtechnika bizonyos esetekben, amennyiben az alkalmazásához szükséges információk rendelkezésre állnak, jól használható. A technika alkalmazásához jelentős mennyiségű információra van szükség, ezért a koncepciók megalkotása során alkalmazása nehézkes, viszont a részletkidolgozás során nagyon nagy jelentősége van (lehetne). Az egyes alaksajátosságok költségeinek ismerete a tervezőnek a részletes tervek kidolgozás során jelentős segítséget nyújthat a költségek minimalása szempontjából. Minden egyes termékjellemzőnek költséghatása van a gyártásra, minél több alaksajátossággal rendelkezik a termék, annál több gyártási és tervezési művelettel rendelkezik [14]. Éppen ezért egy alaksajátosság alkalmazására, vagy elhagyására vonatkozó döntés nagyban befolyásolja az előállítási költségeket, és végül a termék életciklus-költségeit [15].

Az FBC használatának egy másik fontos tényezője, hogy ugyanazon alaksajátosságok különböző alkatrészekben és termékben is megjelenhetnek; ezért az egyes alaksajátosságokra készített alapvető költséginformáció mérnöki szempontból jól hasznosítható. A mérnöki szándék beilleszthető olyan funkciókba, mint a termék funkcionalitása, teljesítménye, gyártási folyamatai és viselkedési jellemzői. Számos kutatás foglalkozik jelenleg is ilyen költségcsökkentési katalógusok kidolgozásával. Bár a funkció alapú költségcsökkentés egyre népszerűbb, korlátozott a használatuk a költségcsökkentési folyamatban, mivel az egyes jellemzők különböző funkcionális szinten jelennek meg, valamint vállalati szinten kell kidolgozni katalógust, az egyes technológiák más-más költségcsökkentési szinteket jelenthetnek.

2.3.4 Neurális hálózat alapú költségcsökkentés (NN)

A költségcsökkentéssel foglalkozó tudományon belül megjelentek a mesterséges intelligencia használatára vonatkozó [16] tanulmányok. A neurális hálózatok (NN) és a fuzzy logika a következő generációt mutatják az emberi gondolkodási folyamatok számítógépesítésében [17]. Számos kutató és szakember foglalkozik a mesterséges intelligencia (MI) rendszerek fejlesztésével és azok használati lehetőségével a költségcsökkentés területén [18, 19, 20]. Költségcsökkentés céljából az NN-ek használatának alapötlete az, hogy egy számítógépes program megtanulja a termékhez kapcsolódó jellemzők költségekre gyakorolt hatását. Ez azt jelenti, hogy számítógép, a szolgáltatott adatok alapján meg tudja tanulni, hogy mely termékjellemzők befolyásolják legjobban a végső költséget. Ezt úgy érik el, hogy a rendszert múltbéli példákban származó adatokkal feltöltik, „képzik”. Az NN ezután közelíti az attribútum értékek és a költség közötti funkcionális kapcsolatot a training időszakban. A training befejezésével a fejlesztés alatt álló termék attribútum értékeinek a betáplálásával a training során előállított közelítő függvény

alkalmazásával kiszámítja a várható költséget. A közelmúltban végzett kutatómunka kimutatta, hogy a neurális hálózatok jobb költség előrejelzést készítenek, mint a hagyományos regressziós költségcsökkentési módszerek, ehhez azonban számos feltételnek teljesülnie kell [19]. Azonban azokban az esetekben, amikor a megfelelő CER rendelkezésre áll, a regressziós modellek jelentős előnyökkel rendelkeznek a pontosság, a változékonyság, a modellalkotás és a modellvizsgálat szempontjából [20].

A neurális hálózat alkalmazása nem csökkenti az előzetes tevékenységekkel kapcsolatos nehézségeket. A költségcsökkentőre továbbra is sok feladat hárul, és az elemzés megkezdése előtt végre kell hajtani a konkrét költségcsökkentési begyűjtését. A modellek alapvetően használhatóak lennének a termék életciklusának minden szakaszában, azonban ennek alapfeltétele, hogy az ehhez szükséges adatok rendelkezésre állnak. A parametrikus költségcsökkentéssel összehasonlítva nagy előnye, hogy képes felismerni az adatok közötti rejtett kapcsolatokat is. Ezért a költségcsökkentés nem kell bizonyítani, vagy felismerni a termék és a költség közötti kapcsolat feltételeit, ami leegyszerűsíti a végleges matematikai összefüggés kidolgozásának folyamatát [18].

A neurális hálózatok nagy esetbázist igényelnek, hogy hatékonyak legyenek, ami nem felel meg a korlátozott terméktartományokat termelő iparágaknak [21]. Ezenkívül az esetalapnak hasonló termékekből kell állnia, és az új termékeknek hasonló jellegűeknek kell lenniük, hogy a költségcsökkentés hatékony legyen. Így a neurális hálózatok nem tudnak kezelni új termékeket vagy innovációkat.

A mesterséges neurális hálózat valójában egy „fekete doboz”. Így az összefüggések nem láthatóak, mely költségcsökkentési oldalról nem jó, mind a költségcsökkentők, mind pedig a tervezők szeretik látni a költségcsökkentés mögötti okokat és feltételezéseket.

2.3.5 Analóg módszer és annak továbbfejlesztése

A tapasztalat alapú technikát analóg módszerként is nevezi az irodalom. Az analóg technika a termékek hasonlóságát használja ki. Az implicit feltételezés szerint a hasonló termékek költségei hasonlóak. A termékek összehasonlításával és a különbségekhez való igazítással érvényes és használható költségcsökkentés érhető el. A módszer az eszközök hasonlóságának és különbségeinek azonosításához szükséges eszközöket igényli, ezenkívül a hatékony használatához nagy adatbázis szükséges. Alapvető feltétele, hogy megfelelő számú korábbi eset áll rendelkezésre, és ezen esetekről az összehasonlításához megfelelő, és elégséges információval rendelkezünk. Az alkalmazásához nagyszámú adatra és azok folyamatos rendezésére és kezelésére van szükség. Az adatbázis felvétele, illetve a hasonlóságok és különbségek azonosítása történhet a korábbi termékek

tapasztalatainak, vagy adatbázisainak felhasználásával. Az analóg módszernek létezik egy modernebb, továbbfejlesztett megközelítése, ezt az irodalom tapasztalat alapú gondolkodásnak nevezi (CBR-Case-Based Reasoning). A CBR a mesterséges intelligencia csoportjába is sorolható, mivel korábbi ismert, történelmi adatok modellezésére, tárolására és újrafelhasználására használható, és ennek felhasználásával szerezhető új tudás. A CBR egyik fontos jellemzője, hogy képes tanulni a múltbéli esetekből / helyzetekből. A CBR rendszer tárolja és rendszerezi a múltbéli eseteket, majd az adott új problémához hasonló eseteket kiválasztja, és az előző megoldások alapján az adaptációt. Az FBC-hez hasonlóan a CBR is egy funkció alapú megközelítés. A megbízhatóság nagyban függ a rendelkezésre álló korábbi esetektől ugyanúgy, mint az analóg módszer esetén. Azon vállalatok esetén, ahol az analóg módszer jól alkalmazható, ez a módszer valószínűleg egy nagyon jó lehetőséget teremt a költségbecslési számítások megbízhatóbbá és hatékonyabbá tételére, azonban új, egyedi és innovatív termékek esetén, mivel bázis adatok, esetek nem állnak rendelkezésre, a koncepcionális szakaszban ezen technikának nincs létjogosultsága. Azonban, ha a részlettervezési szakaszt nézzük, ott már előfordulhatnak olyan esetek, hogy egy adott funkció részletes kidolgozásához megfelelő számú korábbi eset áll rendelkezésre, és így akár a technika hasznosan alkalmazható is.

3. KÖLTSÉGBECSLÉSI MÓDSZEREK FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGE

A korai tervezési fázisban az ismertett technikák közül leginkább a paraméterek becslési technika alkalmazhatósága bizonyított. Azonban ezen technika alkalmazhatóságához költségbecslési kapcsolatok (CER) felállításával parametrikus modellek létrehozása szükséges. Az egyes előforduló, általános tervezési szituációk analitikus elemzésével erre lehetőség van.

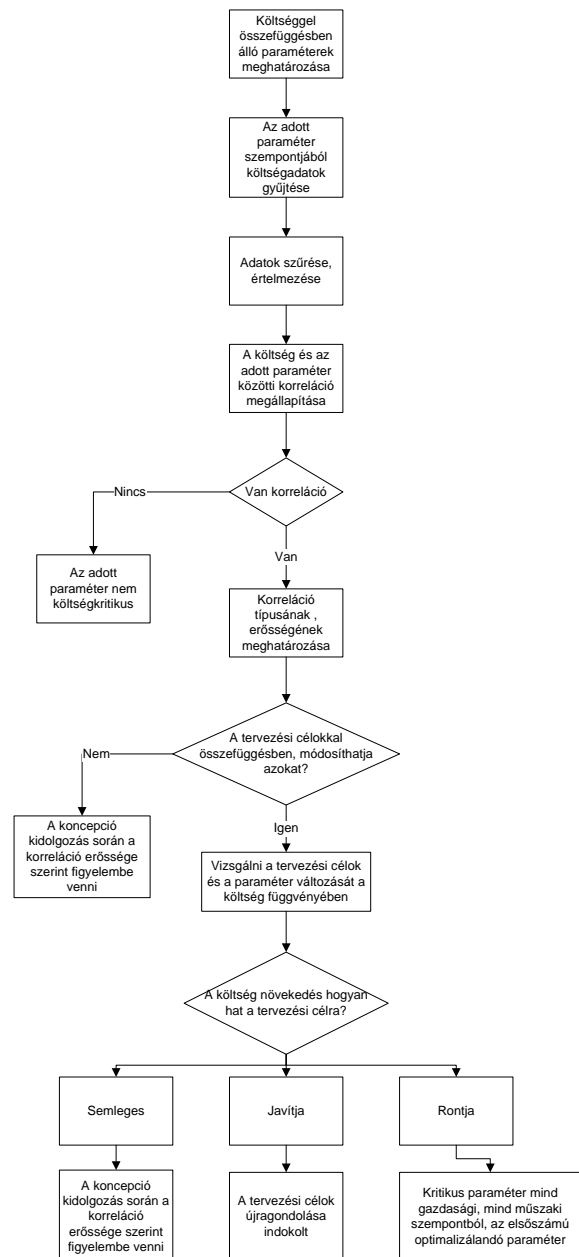
A parametrikus becslés az egyes tényezők költséggel való összefüggésének matematikai reprezentációja. Célja, hogy a termék (projekt) funkcionális vagy fizikai jellemzői alapján előre jelezhető, számítható matematikai kapcsolatot adjon annak költségére vonatkozóan.

A parametrikus költségbecslési modellek felállítására a Larry által leírt folyamatot átdolgozva, abba a gépészeti tervezés jellemzőit bedolgozva két folyamatábra került kidolgozásra. Mindkét eset a gépészeti tervezés koncepcionális fázisában alkalmazható, azonban különböző célokhoz.

Ezen célok:

1. Igények felállítása
2. Megoldási variációk kidolgozása, értékelése, értékelő kritériumok súlyozása

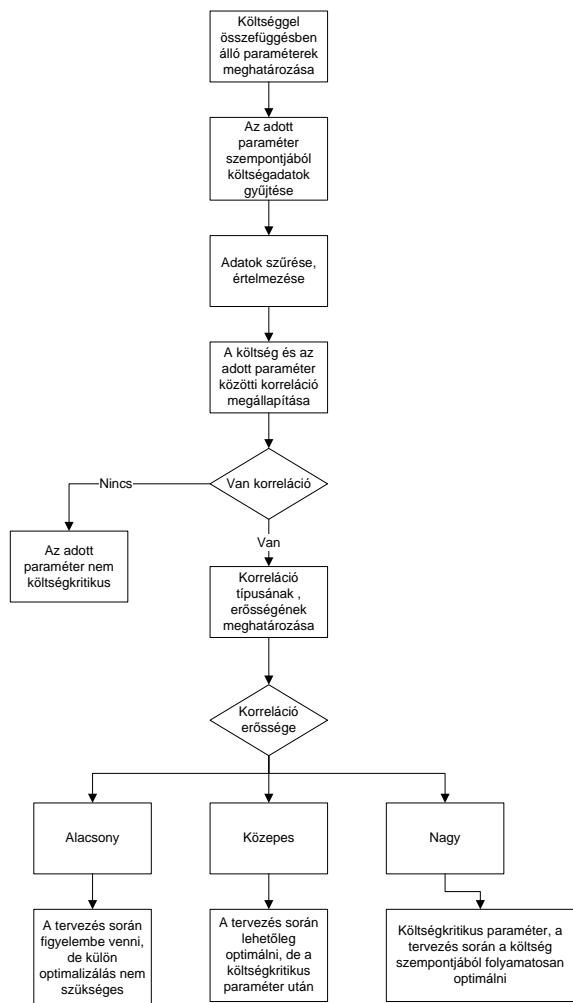
Az igények felállításához használható folyamat a 2. ábrán látható, míg a megoldási variációk kidolgozásához, értékeléséhez, értékelő kritériumok súlyozásához alkalmazható a 3. ábrán található.



2. ábra Parametrikus tervezés folyamatára a koncepcionális tervezési szakaszban, igények követelmények felállítása során

A folyamatábrák tevékenységeinek elvégzése után természetesen a modell tesztelése és dokumentálása is a folyamat részét képezi.

A bemutatott folyamatábrák alapján a mérnöki gyakorlatban hasznosan alkalmazható parametrikus modellek, költségoptimalt tervezési katalógusok felállítására van lehetőség.



3. ábra Parametrikus tervezés folyamatára a koncepcionális tervezési szakaszban, megoldás variációk kidolgozása, értékelése, értékelő kritériumok súlyozása esetén

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Mérnöki szempontból jól alkalmazható költségbecslési technika kidolgozásával jelentősen javítható egy termék versenyképessége. Irodalmi és tapasztalati adatok alapján a paraméteres technika alkalmazásával az egyes tervezési szituációkra kidolgozott paraméteres modellek felállításával jelentősen javítható a költség, mint kritikus tervezési paraméter figyelembevétele már a tervezés korai szakaszában is. A bemutatott folyamatábrák alapján ezen parametrikus modellek felállítása lehetővé válik az egyes tervezési szituációkra, mely alapján mérnöki szempontból jól alkalmazható költségoptimalizációs technika, katalógus hozható létre.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával a K 134358 nyilvántartási számú projekt keretében valósul meg.

6. IRODALOM

- [1] Szűcs Renáta: *Költségbecslési módszerek a koncepcionális gépészeti tervezésben*, Diplomamunka, Miskolci Egyetem, 2019.
- [2] Stewart, R.; Wyskida, R. & Johannes, J. (1995) *Cost Estimator's Reference Manual*. 2nd ed., Wiley Interscience.
- [3] NASA (2002a) *NASA Cost Estimating Handbook*. NASA, www.jsc.nasa.gov/bu2/NCEH/index.htm (3rd December 2002).
- [4] Taylor, I. M. (1997) Cost engineering - A feature based approach. In: *85th Meeting of the AGARD Structures and Material Panel*, Aalborg, Denmark, October 13-14, 1997, pp. 1-9.
- [5] Mileham, R. A.; Currie, C. G.; Miles, A. W. & Bradford, D. T. (1993) A parametric approach to cost estimating at the conceptual stage of design. *Journal of Engineering Design*, 4(2): 117-125.
- [6] Roy, R.: *Cost engineering: why, what and how?* Cranfield University 2003., ISBN 1-861940-96-3
- [7] Benotsmane, R., Kovács, Gy., Dudás, L.: Economic, Social Impacts and Operation of Smart Factories in Industry 4.0 Focusing on Simulation and Artificial Intelligence of Collaborating Robots, *Social Sciences* 8: 5 Paper: 143 (2019).
- [8] Eric S. Rebentisch: Challenges in the Better, Faster, Cheaper Era of Aeronautical Design, Engineering and Manufacturing, *Aeronautical Journal New Series* 104(1040) September 2002
- [9] Farineau, T., Rabenasolo, B., Castelain, J.M., Meyer, Y.: Use of Parametric Models in an Economic Evaluation Step During the Design Phase, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 17(2):79-86, 2001.
- [10] Niazi, A., Dai, J.S., Balabani, S., Seneviratne, L.: Product Cost Estimation: Technique Classification and Methodology Review, *Journal of manufacturing science and engineering*. 128(2): 563-575, 2006.
- [11] Wierda, L. S. (1991) Linking design, process planning and cost information by featurebased modelling. *Journal of Engineering Design*, 2(1): 3-19.
- [12] Catania, G. (1991) Form-features for mechanical design and manufacturing. *Journal of Engineering Design*, 2(1): 21-43.
- [13] Ou-Yang, C. & Lin, T. S. (1997) Developing an integrated framework for feature based early manufacturing cost estimation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13: 618-629.
- [14] Brimson, J. A. (1998) Feature costing: Beyond ABC. *Journal of Cost Management*, pp. 6-12.
- [15] Kekre, S.; Starling, S. & Therani, M. (1999) *Feature based cost estimation in design*. <http://barney.sbe.csuhayward.edu/ssstarling/starling/working2.htm> (22nd February 1999).
- [16] Rush, C. & Roy, R. (2000) Analysis of cost estimating processes used within a concurrent engineering environment throughout a product life cycle. *Proceedings of CE2000 Conference*, Lyon, France, July 17-21, 2000, pp. 58-67.
- [17] Villarreal, J. A.; Lea, R. N. & Savely, R. T. (1992) Fuzzy logic and neural network technologies. In: *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Houston, Texas, January 6-9, 1992.
- [18] Hornik, K.; Stinchcombe, M. & White, H. (1989) Multilayer feed-forward networks are universal approximators. *Neural Networks*. 2: 359-366.
- [19] Bode, J. (1998) Neural networks for cost estimation. *American Association of Cost Engineers*, 40(1): 25-30.
- [20] Smith, A. E. & Mason, A. K. (1997) Cost estimation predictive modelling: Regression versus neural network. *Engineering Economist*, 42(2): 137-162.
- [21] Rush, C. & Roy, R. (2000) Analysis of cost estimating processes used within a concurrent engineering environment throughout a product life cycle. *Proceedings of CE2000 Conference*, Lyon, France, July 17-21, 2000, pp. 58-67.