

MŰSZAKI SZEMLE
68. szám, 2016.

Szerkesztőbizottság elnöke /
President of Editing Committee

Dr. Köllő Gábor

Szerkesztőbizottság tagjai /
Editing Committee

Dr. Balázs L. György – HU
Dr. Barabás István – RO
Dr. Biró Károly Ágoston – RO
Dr. Csibi Vencel-József – RO
Dr. Fedák László – UA
Dr. Karácsony János – RO
Dr. Kása Zoltán – RO
Dr. Kontra Jenő – HU
Dr. Majdik Kornélia – RO
Dr. Nagy László – RO
Dr. Péics Hajnalka – RS
Dr. Sebestyén-Pál György – RO
Dr. Szalay György – SK
Dr. Turchany Guy – CH
Dr. Zsuga Miklós – HU

Kiadja / Editor

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

Felelős kiadó / Managing Editor

Dr. Köllő Gábor

A szerkesztőség címe / Address

Romania
400604 Cluj, Kolozsvár
B-dul 21. Decembrie 1989., nr. 116.
Tel/fax: 40-264-590825, 594042
Levélcím: RO – 400750 Cluj, C.P. 1-140.

Nyomda / Printing

Incitato Kft.

ISSN 1454-0746

www.emt.ro

emt@emt.ro

Tartalomjegyzék – Content – Cuprins

Optikai feszültségvizsgálati lehetőségek 3D nyomtatással előállított vizsgálati réteg segítségével Opportunities of Optical Photostress Investigations by 3D Printed Test Layer Posibilități privind analiza stării de tensiuni prin metode fotoelastice utilizând straturi obținute prin tipărire 3D	
FICZERE Péter	3
A Lean Ellátási Láncok jellemzőinek bemutatása Characteristics of Lean Supply Chains Caracteristicile rețelei de aprovizionare-distribuție Lean	
KOVÁCS György	8
Az AlNiCo és NbFeB mágneses anyagok korróziós viselkedése sósavban Corrosion Behavior of AlNiCo and NdFeB Magnetic Materials in Hydrochloric Acid Comportarea corozivă a materialelor magnetice AlNiCo și NdFeB în soluție de acid clorhidric	
PATROI Delia, MITREA Sorina, LINGVAY Mónika, LINGVAY József	13
A búza (<i>Triticum aestivum</i> L.) összesszelen-tartalma és a talaj típusa közötti összefüggés Correlation Between the Total Selenium Content of the Wheat Seeds and the Soil Types Relația dintre conținutul de seleniu total al grâului (<i>Triticum aestivum</i> L.) și tipul solului	
TAMÁS Melinda, Csapó János	20
Raktár-irányítási rendszerek hatékonyságnövelési lehetőségeinek vizsgálata Examination of Efficiency Improvement Possibilities for Warehouse Management Systems Analiza posibilităților de îmbunătățire a eficienței sistemelor de gestionare a depozitelor	
TAMÁS Péter, ILLÉS Béla	29
Gömbhéjak poligonális horpadási alakjának vizsgálata Examination of Polygonal Buckling Shapes of Spherical Shells Studiul pierderii stabilității locale sub forma poligonală ale învelitorilor sferice	
VETŐ Dániel, SAJTOS István	37

Optikai feszültségvizsgálati lehetőségek 3D nyomtatással előállított vizsgálati réteg segítségével

Opportunities of Optical Photostress Investigations by 3D Printed Test Layer

Posibilități privind analiza stării de tensiuni prin metode fotoelastice utilizând straturi obținute prin tipărire 3D

Dr. FICZERE Péter

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem - Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék
1111 Budapest, Stoczek utca 2. St épület II. emelet 208.

ABSTRACT

This article aims to investigate the applicability of the measurement technology supported by additive manufacturing. During product development the numerical simulations made on virtual, digital prototypes. The results of the simulations should always be validated in a study conducted in a real model. One of the best method to determinate the stress state on a loaded element is the optical photostress investigation. The 3D printed test layer greatly simplify these tests.

Keywords: optical photostress investigation, 3D printing, RPT, stress distribution

ÖSSZEFOGLALÓ

Cikkemben a napjainkban hatványozott mértékben terjedő additív gyártási technológiák esetleges mérés-technikai alkalmazhatóságát vizsgálom. A termékfejlesztés során a numerikus szimulációk, virtuális, digitális prototípusokon végzett vizsgálatok eredményeit mindig célszerű valamilyen valós modellen végzett kísérlettel validálni. Egy alkatrész adott terhelés hatására kialakuló feszültségállapotának meghatározására a legjobb módszer az optikai feszültségvizsgálat. A vizsgálathoz szükséges réteg 3D nyomtatással történő előállítása nagymértékben egyszerűsítheti ezeket a vizsgálatokat.

Kulcsszavak: feszültségoptikai vizsgálat, 3D nyomtatás, RPT, feszültség eloszlás

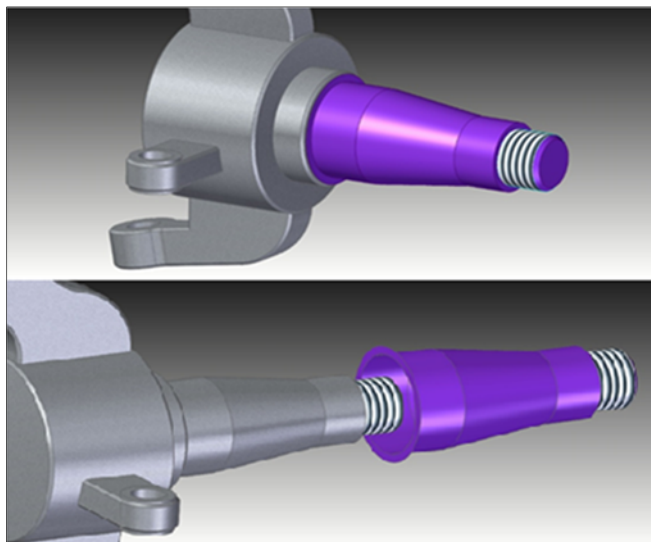
1. BEVEZETÉS

Az új alkatrészek tervezése során a mérnökök egyre több és jobb szoftver segítségével dolgozhatnak. A CAD modellezés során az alkatrész 3D modelljének elkészítése után a gyártáshoz szükséges alkatrészarajzok, nézetek, metszetek könnyen elkészíthetők [1], [2]. Az alkatrészekből komplett összeállításokat, szereléseket képezhetünk a megfelelő kényszerek definiálásával. A szerelési környezetben ütközésvizsgálatot, működési analízist, mozgás szimulációt is végezhetünk. Az alkatrésznek a szerelésben elfoglalt helye – a beépítési környezete – meghatározza a kényszereket. Az alkatrészek anyagtulajdonságainak, anyagjellemzőinek ismeretében, a várható igénybevételeknek megfelelően méretezhetjük is az alkatrészünket. Ehhez a 3D modelltől képezett végeselemes modellre van csak szükség. A numerikus szimulációk eredményeképpen pedig megkaphatjuk egy adott alkatrésznek az adott – várható – terhelésére adott válaszát, azaz a terhelés hatására ébredő feszültségeket és deformációkat [3]. Napjainkban újabb és újabb anyagok jelennek meg a járműiparban, ilyenek például a kompozitok a 3D nyomtatás anyagai, melyek viselkedése nem mindig ismert. Továbbá sok esetben a várható igénybevételeket, terheléseket is csak becsülni tudjuk. Ahhoz, hogy meggyőződünk a használt anyagmodellek megfelelőségéről, mindenképpen valamilyen módon validálni kell az anyagmodellt. Ennek egyik legjobb módszere az optikai feszültségvizsgálat [4], [5]. Az optikai feszültségvizsgálat másik nagy előnye, hogy abban az esetben, ha nem ismerjük a pontos terhelést, segítségével átfogó képet kaphatunk a vizsgált alkatrész valós igénybevételeiről [6]. Az optikai feszültségvizsgálat viszont komoly szakértelmet és meg-

fontolást igényel. A vizsgálathoz, egész pontosan a vizsgálati réteg elkészítéséhez és felhelyezéséhez jelentős előkészületek szükségesek [7]. Vizsgálatom során arra keresem a választ, hogy a 3D nyomtatással előállított anyagok alkalmasak-e feszültségoptikai vizsgálati réteggént való felhasználásra, és ha igen, akkor milyen feltételekkel.

2. MÓDSZER

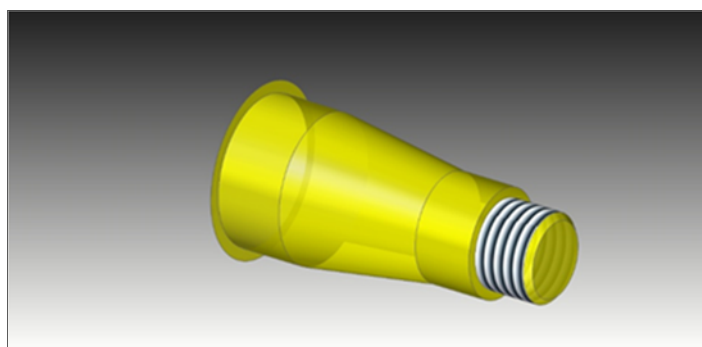
Feltételezve, hogy az alkatrészek már rendelkeznek 3D CAD modellel, annak a vizsgált felületéhez képest bármilyen bonyolult geometria esetén könnyen létre tudunk hozni egy ún. ofszet felületet.



1. ábra

Ofszet felület létrehozása a vizsgált területen

A következő ábrán a vizsgált felületet és a belőle képzett ofszet felületet láthatjuk egy tengelycsonk esetében. Az így létrehozott felületekhez adott vastagsági értéket rendelve, rögtön, egyben megkapjuk a teljes rétegbevonatot a vizsgálathoz szükséges egyenletes és állandó vastagságban. Ezt az additív gyártástechnológiák segítségével azonnal el is tudjuk készíteni

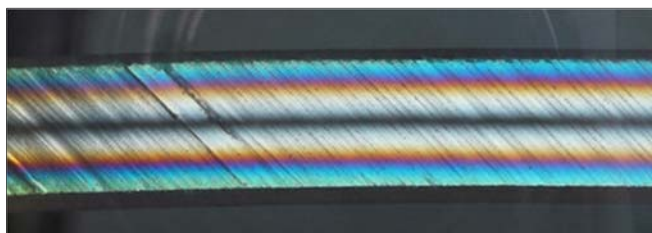


2. ábra

A vizsgálandó felülethez tökéletesen illeszkedő rétegbevonat nyomtatható állandó, szinte tetszőleges vastagságban

Ezzel az eljárással könnyen, gyorsan, komoly tapasztalat nélkül is készíthető réteg-bevonatos optikai feszültségvizsgálathoz szükséges bevonat [8]. Az új módszer segítségével sok hibalehetőség kizárható. Meg kell jegyezni, hogy tetszőleges additív gyártástechnológiával készített bevonat nem alkalmazható ilyen célra. Az optikai feszültségvizsgálathoz kizárólag optikailag aktív, áttetsző darabot produkálni képes technológiák és anyagok alkalmazhatók. A 3D nyomtatási technológiák közül egy OBJET nyomtatóval, polyjet eljárással, valamint egy Hephestos Prusa i3 FDM típusú nyomtatóval készült darabot vizsgáltam. Egy adott (4 mm) vas-

tagságú próbatestet polimerizációs szűrők között átvilágítva vizsgáltam. Terhelés (hajlító igénybevétel) hatására kialakuló eredményt, színsáv ábrát láthatunk a következő ábrán.



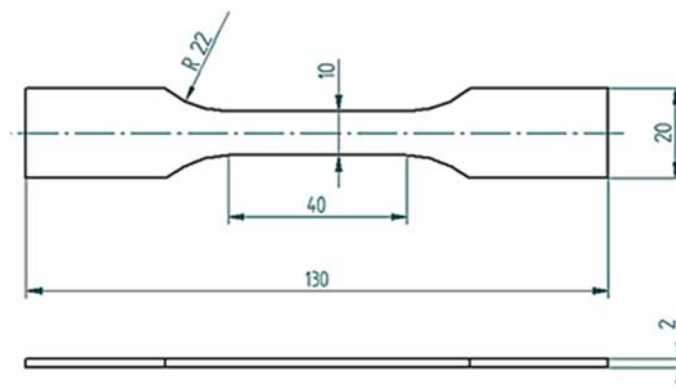
3. ábra

3D nyomtatással készült próbatesten hajlítás hatására kialakuló színsávok

Az egyes színek és rendszámok értelmezéséhez természetesen itt is kalibrációra van szükség [7].

3. EREDMÉNYEK

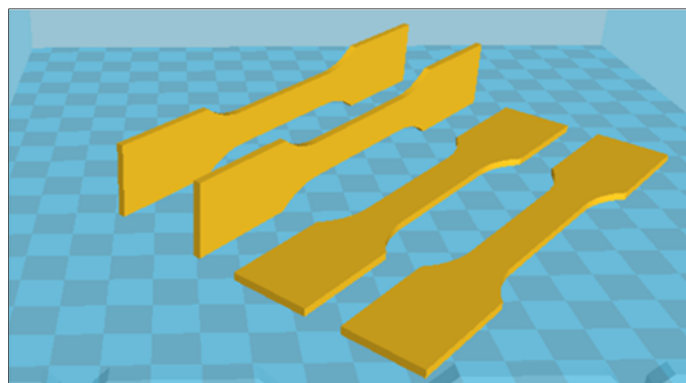
A 3D nyomtatott anyagok feszültségoptikai vizsgálathoz történő vizsgálóréteggént való alkalmazáshoz ismernünk kell az adott anyag optikai érzékenységét. Korábbi kutatásokról kiderült, hogy a 3D nyomtatott anyagok orthotrop anyagtulajdonságokkal rendelkeznek, így az is kérdéses, hogy a különböző irányban, helyzetben gyártott próbatesteken azonos terhelés hatására a színsávábrák hogyan alakulnak. Különböző helyzetben készítettünk szabványos rövid húzó próbatesteket annak eldöntésére, hogy az adott anyag alkalmas-e vizsgálóréteggé feszültségoptikai vizsgálatokhoz.



4. ábra

Szabványos rövid szakítópróbatest

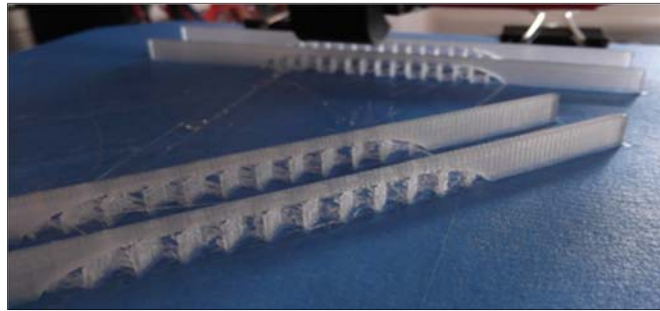
A próbatesteket fekvő és álló helyzetben is elkészítettük, különböző irányokban.



5. ábra

Fekvő és álló helyzetű próbatestek

Az álló helyzetben nyomtatott próbatetek esetében természetesen támaszt is használtunk, amely az alábbi ábrán is látható.

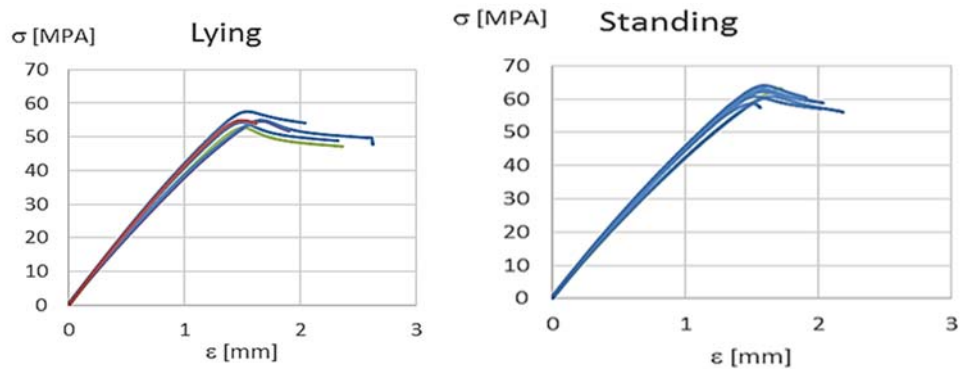


6. ábra

Alátámasztások az álló próbatetek nyomtatása során

Az így legyártott próbateteket szakítóvizsgálatnak vetettük alá. A vizsgálat során a próbatetekben kialakuló feszültségeloszlást polarizációs szűrők segítségével vizsgáltuk és jelenítettük meg.

A fekvő helyzetben nyomtatott próbatetek vizsgálata során kapott eredmények az alábbi ábra bal oldalán láthatók.



7. ábra

Fekvő (balra) és álló (jobbra) elrendezésben gyártott próbatetekeken végzett szakítóvizsgálat eredményei

Érdeemes megfigyelni, hogy az álló pozícióban gyártott próbatetek szakítószilárdsága kb. 20%-kal nagyobb, ahogyan ez a 7. ábra jobb oldali diagramjáról leolvasható.

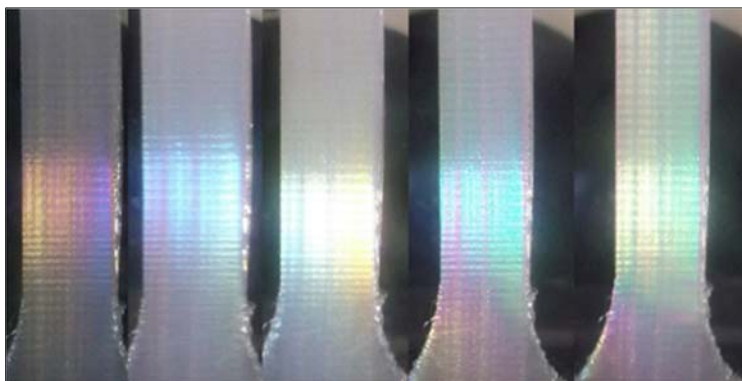
A következő ábrán látható a feszültség kialakulása terhelés hatására. Jól megfigyelhető a feszültség fel-futása, majd a szakadás után a tehermentes, feszültségmentes állapotba történő visszaállás.



8. ábra

Feszültség kialakulása növekvő terhelés hatására (fekvő elrendezés)

Az alábbi ábrán jól látható, hogy a kezdeti terheletlen állapotban sem feszültségmentes a próbatest. Érdeemes megfigyelni azt is, hogy húzó igénybevétel hatására a próbatest feszültségmentessé válik, majd újra növekszik a feszültség értéke.



9. ábra

A feszültségi állapot változása növekvő terhelés hatására (álló elrendezés)

4. ANALÍZIS

A 9. ábrát elemezve megállapítható, hogy az álló helyzetben nyomtatott alkatrészek esetében már a gyártás során maradó feszültségek kerülnek az alkatrészbe. Az eredményeket megvizsgálva az is megállapítható – mivel húzó igénybevétel hatására kezdetben csökken a feszültség – hogy a gyártás során feltételezhetően nyomófeszültségek keletkeznek az alkatrészekben.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatok alapján tehát kijelenthető, hogy a 3D nyomtatás gyártási paraméterei nagymértékben befolyásolják az alkatrész feszültségállapotát. Ezért feszültségoptikai vizsgálatokra az eljárás csak korlátozott mértékben alkalmas.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Győri, M., & Ficzer, P. (2016). *Increasing Role of Sections Caused by 3D Modelling*. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 44(3), 164-171. (2016)
- [2] Ficzer, P., Győri, M. (2016). *A mérőhálózatok átalakulása a 3D CAD modellek megjelenésével* GÉP LXVII:(4) pp. 5-8. (2016)
- [3] Ficzer Péter, Török Ádám (2013). *Gépjárműalkatrészek biztonságkritikus optimalása* A JÖVŐ JÁRMŰVE: JÁRMŰIPARI INNOVÁCIÓ 8:(3-4) pp. 66-70. (2013)
- [4] Peter Ficzer, Lajos Borbás, Adam Torok (2014). *Validation of Numerically Simulated Rapid-prototype Model by Photoelastic Coating* ACTA MECHANICA SLOVACA 18:(1) pp. 14-24. (2014)
- [5] L. Borbás, P. Ficzer: (2012). *Validation Of Numerical Analysis Results In Case Of Rapid Prototyping By Experiments Using Optical Techniques*. Proceedings of the 29th Danubia-Adria-Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Belgrad, Serbia, 2012.09.26-2012.09.29., pp. 68-69. (ISBN:9788670837621), 2012.
- [6] Peter FICZERE (2015). *Usage of 3D printing in photostress investigation* PRODUCTION ENGINEERING ARCHIVES / ARCHIWUM INŻYNIERII PRODUKCJI 7:(2) pp. 16-19. (2015)
- [7] Ficzer Péter, Borbás Lajos, Lovas László (2015). *Feszültségoptikai vizsgálatok fejlesztési lehetőségei 3D nyomtatási technológia segítségével* GÉP LXVI:(5-6) pp. 43-46. (2015)
- [8] Ficzer P. (2015). *USAGE OF 3D PRINTING IN PHOTOSTRESS INVESTIGATION*, Production Engineering Archives Vol. 7, No. 2 (2015), ISSN 2353-7779, pp. 16-19

A Lean ellátási láncok jellemzőinek bemutatása

Characteristics of Lean Supply Chains

Caracteristicile rețelei de aprovizionare-distributie Lean

Dr. KOVÁCS György

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Logisztikai Intézet,
3515 Miskolc-Egyetemváros
tel: 36/46 565-111, fax: 36/46 563-399, e-mail: altkovac@uni-miskolc.hu

ABSTRACT

Globalisation, increasing competition, more and more complex products requires new technologies, methods and processes. The complexity of final products and new customer requirements requires efficient operation of supply chains (SC). Optimisation of supply chains results new models, concepts of value chains. This study shows the Lean Manufacturing Philosophy applied by the members of the Lean Supply Chains.

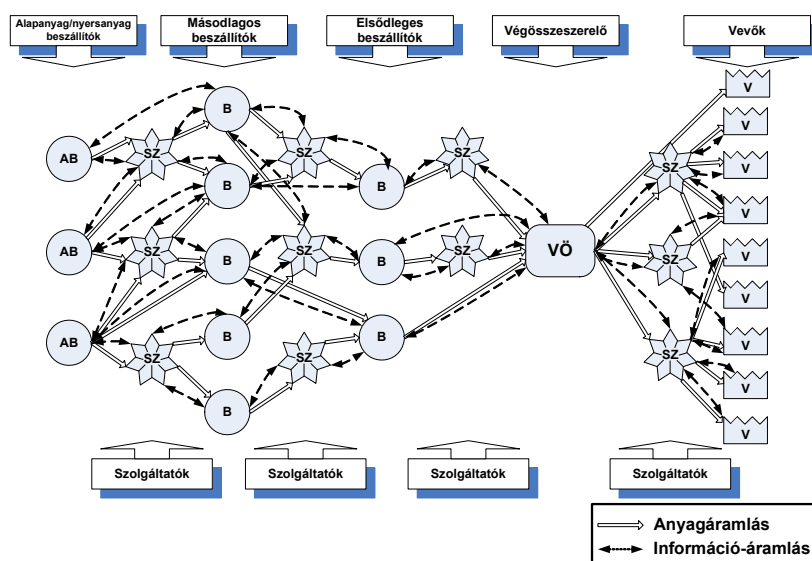
ÖSSZEFOGLALÓ

A globalizációnak, az egyre inkább növekvő piaci versenynek, az egyre komplexebb termékeknek, az egyre rövidebb életciklusú termékeknek, valamint az egyre gyakrabban változó vevői igényeknek köszönhetően új gyártási technológiák és üzleti folyamatok alkalmazása válik szükségessé. A vállalatok versenyképességének megőrzése érdekében új ellátási lánc koncepciókat vezetnek be. A dolgozat a Lean ellátási láncok szereplői által alkalmazott Lean Termelési Filozófiát mutatja be részletesen.

Kulcsszavak: Ellátási lánc, Lean ellátási lánc, értékteremtő folyamatok, veszteségek

1. ELLÁTÁSI LÁNC, ELLÁTÁSI LÁNC STRATÉGIÁK

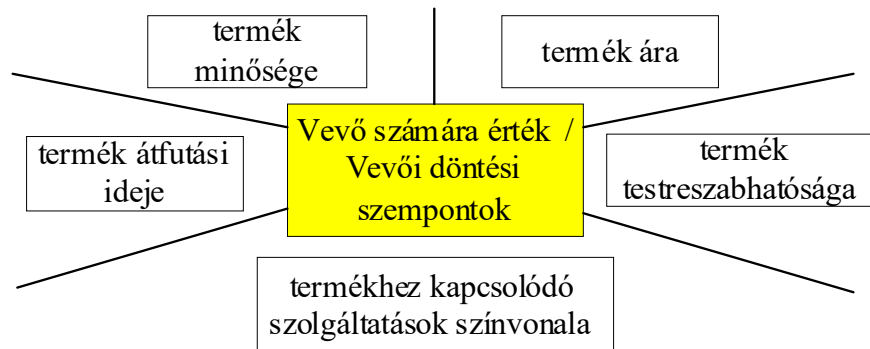
Az ellátási lánc beszállítók, termelő vállalatok, szolgáltatók és vevők hálózata, amelyek között több irányú anyag- és információáramlás valósul meg (1. ábra). Az ellátási lánc tulajdonképpen üzleti partnerek hálózatszerű együttműködése egy közös cél érdekében, ami nem más mint a vevői igények maximális kielégítése.



1. ábra
Ellátási lánc hálózata

A gyorsan változó piaci környezetnek és a globális versenynek köszönhetően az ellátási láncok egyre komplexebb hálózatokká válnak. Az egyes láncok versenyképessége a partnerek kompetenciáinak minél jobb kihasználásából és szinergiájából adódik.

A globális piacon azonban az ellátási láncok is versenyeznek egymással a vevők igényeinek minél magasabb színvonalú kielégítése érdekében. A vevők a késztermékek megvásárlásával egyben a terméket előállító ellátási láncok közül is választanak számos szempont alapján. A legfőbb döntési szempont a termék költsége, átfutási ideje, minősége, testreszabhatósága, valamint a termékhez kapcsolódó szolgáltatások színvonala (2. ábra).



2. ábra
Vevői döntések szempontjai

Az ellátási láncok típusainak, működési stratégiáinak bemutatásával és elemzésével, az ellátási lánc menedzsmenttel, valamint a hálózatok optimalizálásával nagy számú szakirodalom foglalkozik [1, 2]. Működési stratégiáját tekintve manapság háromféle új ellátási lánc koncepció válik egyre elterjedtebbé, az egyik a karcsú a másik az agilis paradigma, illetve ezek kombinációja. A dolgozat első részében az egyes ellátási lánc koncepciókat mutatom be számos szakirodalom elemzése alapján, többek között a [3, 4].

1.1. Lean/Karcsú ellátási lánc (Lean Supply Chain)

A Lean ellátási lánc alkalmazásának elsődleges célja a veszteségek csökkentése a teljes ellátási láncban, vagyis a nem értékteremtő folyamatok kiküszöbölése, továbbá a folyamatok állandó tökéletesítése és javítása. Ezen célkitűzések eléréséhez számos Lean eszköz áll rendelkezésre, mint például a várakozási idők csökkentése, az átállási idők csökkentése, stb. Így a hagyományos ellátási láncokhoz képest kisebb volumenű egyedibb, gazdaságosabb és rugalmasabb gyártás valósítható meg.

Ezen stratégia jellemzője, hogy főként a relatív hosszú élettartamú (1-2 évnél hosszabb) termékek előállításánál alkalmazható, a lánc szereplői hagyományos hálózatszerűen működő szervezeti formában működnek [3]. A beszállítói kör kiválasztásánál az alacsony ár és a magas szolgáltatási színvonal a meghatározó. További fő jellemzője a gyors forgású és minimális nagyságú készletek tartása a teljes láncban, valamint a lánc egyes szereplőinek hatékony működése.

1.2. Agilis ellátási lánc (Agile Supply Chain)

Az agilitás („mozgékonyosság”) a késztermék-előállító vállalat és a vevői piac közötti kapcsolatra vonatkozik, vagyis hogy a vevői igények változására mennyire rugalmasan tud válaszolni az ellátási lánc. Az agilis ellátási lánc versenyképességét és profitját a lánc piaci kihívásokra való minél gyorsabb reagálási képessége jelenti.

A lánc sikerének kulcsa a vevői követelmények megértése és minél magasabb színvonalon való kielégítése, valamint a piaci igények várható változásához való alkalmazkodási képesség javítása. A gyártott termékek egyre inkább a vevői igényekre testreszabottak, vagyis egyre egyedibbek, mely egyedi termékeket egyre kisebb darabszámban, egyre rövidebb átfutási idővel és egyre kisebb költséggel kell gyártani.

Ezen stratégia jellemzője, hogy a rövid életciklusú (maximum 1 év) innovatív termékek előállításánál alkalmazzák, valamint a lánc szereplői az együttműködés dinamikus formájában, a virtuális vállalati hálózatok keretében működnek [3]. A beszállítói kör kiválasztásánál a rugalmasság, a gyorsaság és a magas szolgáltatási színvonal a meghatározó szempont.

1.3. Hibrid ellátási lánc (Leagible Supply Chain)

A hibrid ellátási lánc a karcsú és az agilis ellátási láncok kombinációja, mely ötvözi a karcsú és az agilis paradigmák előnyeit. Ez a stratégia jellemzően a „rendelésre összeszerelt” termékek gyártása esetén alkalmazott, ahol a vevői előrejelzések már viszonylag pontosak, és innovatív alkatrészek alkalmazásával a késztermékek egységisége és színvonala növelhető. A stratégia egy széles, testreszabott késztermék portfólió megvalósítását teszi lehetővé.

Ezen stratégia jellemzője, hogy a lánc termelő vállalatai a gyártás során a Lean technikákat alkalmazzák, a vállalatok együttműködése során kihasználják a stratégiai együttműködés előnyeit a dinamikus változó vevői igények követése érdekében. A beszállítói kör kiválasztásánál az alacsony költség és a magas minőség a meghatározó, emellett a rugalmasság és a gyorsaság is fő szempont. További fő jellemzője – az előző stratégiákhoz hasonlóan – a minimális készletek tartása a teljes láncban, a lánc egyes szereplőinek hatékony működése, valamint a minimális átfutási idők.

2. A LEAN TERMELÉSI FILOZÓFIA

A Lean termelési filozófia alkalmazása egy kiváló eszköz ahhoz, hogy a vállalatok javítani tudják piaci pozíciójukat. A filozófiát manapság számos szektorban alkalmazzák, pl. az autóiparban, az elektronikai iparban, hivatalokban, egészségügyben, stb.

A fókuszban a tevékenységek költségeinek csökkentése áll, a nem értékteremtő tevékenységek részarányának csökkentése, illetve kiküszöbölése révén [5-7].

A filozófia a Toyota Termelési Rendszerből (Toyota Production System – TPS) ered.

A Lean termelési rendszer alkalmazásának fő célja a minőség javítása, a veszteségek csökkentése és a költségek optimalizálása a termelési folyamatokban a versenyképesség javítása érdekében. A Lean alapú termelés központjában az értékteremtő folyamat megteremtése, illetve a teljes rendszer vagy folyamat hatékonysága áll. A fő cél a folyamatos termékáramlás kialakítása, valamint az értékteremtő tevékenységek részarányának növelése.

A Lean Termelési Rendszerben rejlő lehetőségeket, előnyöket az alábbi KPI (Key Process Indicator - Kulcsfolyamat jellemző) mutatók javulásával szokták kifejezni: átfutási idő csökkenése, gép átállási idők csökkenése, készletek csökkenése, szabad gyártófelület növekedése, termékminőség javulása, a termelő berendezések általános hatékonyságának javulása, termelékenység növekedése.

A Lean alapú termelés előnyei:

- rövid átfutási idők,
- a fenntartott készletek mennyisége és költsége minimálisan tartható,
- a folyamatok időbeli kiegyensúlyozottsága, szűk keresztmetszetek feloldása,
- a vevői ütem szerinti gyártás,
- a folyamatos fejlesztés/fejlődés iránti elkötelezettség, azonnali problémafeltárás és megoldás,
- a gép átállási idők csökkenthetők,
- gyártófelület szabadítható fel az értékteremtő tevékenységek végzésére,
- a selejtes darabok száma csökken,
- a termelési folyamatokban a termékek várakozási ideje csökken,
- a felesleges anyagmozgatás megszűnése,
- rendezettebb, hatékonyabb munkakörnyezet kialakítása,
- a munkaerő jobb kihasználtsága,
- a termékminőség javul,
- a termelő berendezések általános hatékonysága javul,
- a termelékenység nő,
- javuló kommunikáció, munkahelyi légkör.

3. A LEAN ALAPPILLÉREI ÉS A JELLEGZETES VESZTESÉGTÍPUSOK

A Lean filozófia nem csupán egy termelési rendszer, hanem a vállalati kultúra alapját is képezi, mely egy hosszú távú elkötelezettség a vállalat vezetősége és valamennyi dolgozója részéről. A Lean Termelési Rendszer alap gondolatait először James P. Womack és Daniel T. Jones írta le, akik a Lean filozófiának az öt alappilléret az alábbiak szerint fogalmazták meg [5-11]:

- Meg kell határozni azokat az értékeket, melyek értéket képviselnek a vevő számára. – *Érték*
- Definiálni kell a folyamat lépéseit. – *Értékfolyamat*
- Úgy kell kialakítani a termék előállításához szükséges teljes folyamatot, hogy (lehetőleg) csak értékteremtő tevékenységek valósuljanak meg. – *Áramlás*
- Húzó logisztika használata minden lépésnél, ahol a folyamatos gyártás megvalósítható. – *Húzó elv*
- Folyamatos tökéletesítés a vevői igények változásainak figyelembevételével. – *Tökéletesítés*

Ennek az öt lépésnek az a célja, hogy végül a vállalat kiváló minőségben, alacsony áron, költséghatékonyan, rövid átfutási idővel, magas szintű biztonsággal és kiváló szervezeti kultúrában gyártson.

A termelés folyamatát – a megrendeléstől kezdve egészen a kiszállításig – meg kell vizsgálni annak fényében, hogy mely műveletek építenek értéket a termékbe.

Az értékteremtés szempontjából a tevékenységek az alábbi három kategóriába sorolhatók:

- *értékteremtő tevékenység* (pl. megmunkálás, összeszerelés, ...),
- *szükséges, bár értéket nem teremtő tevékenység* (pl. szerszámcsere, szükséges anyagmozgatás, ...),
- *veszteséget termelő tevékenység* (pl. túltermelés, fölösleges készletek fenntartása, ...).

Értékteremtő műveletnek nevezzük azokat a tevékenységeket, amelyek értéket képviselnek a vevő számára, és ezért hajlandó is fizetni.

Nem értékteremtő tevékenységek a veszteségek, melyeknek három fő kategóriája van:

- Muda – a szószerinti veszteség (minden olyan műveletet magában foglal, amely konkrét veszteséget termel, 7 fő típusa van),
- Muri – túlterhelés,
- Mura – egyenetlenség.

A Taiichi Ohno által leírt 7 veszteség és azok magyarázata a következő [11]:

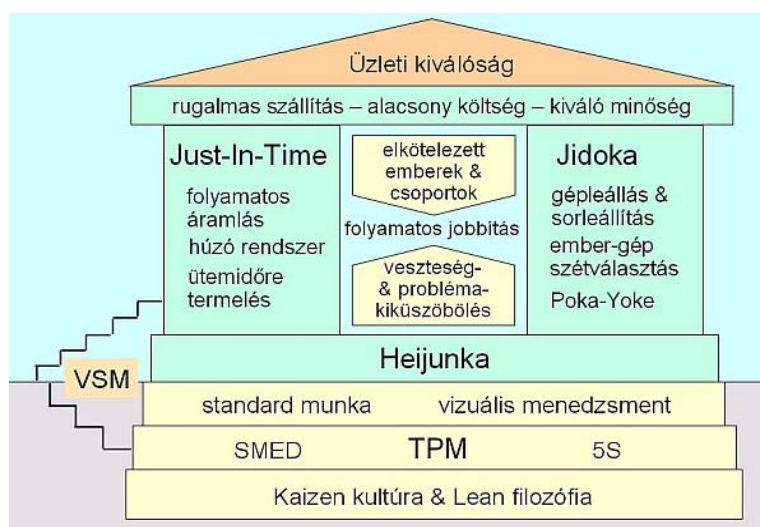
- Túltermelés és korai termelés – a vevői igényekhez képest többet termelünk, vagy hamarabb állítjuk elő a megrendelt termékeket.
- Várakozási idő – nem végzünk értékteremtő műveletet, várakozunk alapanyagra, információra, előző vagy következő műveletre.
- Szállítás – többszöri anyagkezelés, szükségtelen anyagmozgatás.
- Készletek – felesleges nyersanyagok, gyártásközi készletek (WIP – work in process) és késztermékek.
- Mozgás – felesleges mozgások értékteremtés nélkül.
- Túlzott megmunkálás – ami nem ad többletértéket a termékhez.
- Selejtes termékek gyártása, vagy selejtek javítása.
- + Minden gyártásban további egyedi veszteségek fordulhatnak elő, például:
 - kiaknázatlan emberi kreativitás,
 - nem megfelelő eszközök, rendszerek,
 - elpazarolt energia, víz, szennyezés.

Ha megfigyeljük egy tipikus termelési értékáram teljes folyamatát (Értékáram Térkép – Value Stream Map), több mint 90 százalékban nem értékteremtő műveleteket végzünk benne. Értékáram fogalmán értünk minden olyan műveletet, amelyet elvégzünk az alapanyagokon annak érdekében, hogy félkész termék, majd késztermék legyen belőlük, egészen a kiszállításig. A veszteségek valamennyi vállalatnál jelen vannak, a fő feladat a veszteségek beazonosítása, kezelése és minimalizálása a versenyképesség fokozása érdekében.

4. A LEAN TERMELÉSI FILOZÓFIA FŐBB ESZKÖZEI ÉS TECHNIKÁI

A Lean termelési filozófia főbb eszközei és technikái a következők: Értékáram Térkép – Value Stream Map; JIT, One-piece flow; Takt-time analízis; Heijunka; Single Minute Exchange of Dies (SMED); Jidoka; Húzó rendszer; Kanban; Kaizen; Szabványosított folyamatok; 5S; TPM; 6σ; Cellarendszerű gyártás; Nulla hibával történő gyártás-ZD, Vizuális menedzsment, Folyamatszabályozás; Poke-yoke; stb.

A fent felsorolt valamennyi Lean eszköz és technika a gyártási folyamatok tökéletesítésére szolgál, a vállalati költségek csökkentésére és a hatékonyság növelésére. Bár a Lean messze több mint módszerek gyűjteménye, az alábbi 3. ábra bemutatja a legfontosabb eszközöket (a Lean ház építőelemeit) és ezek egymásra épülésének logikáját.



3. ábra
A Lean ház építőelemei
 (forrás: www.hpcconsulting.hu)

A Lean termelési filozófia és a Lean vállalat azt jelenti, hogy a fókuszban a vevő igénye szerinti termék veszteségmentes gyártása van, a vevő által elvárt ütemben.

A Lean Ellátási Láncok esetében törekedni kell arra, hogy az ellátási lánc valamennyi eleme alkalmazza a Lean termelési filozófiát, így a teljes ellátási láncban biztosítható a veszteségmentes folyamatok kialakítása, vagyis a Lean filozófia által kínált célok megvalósítása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 691942". „A kutatómunka a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Mechatronikai és Logisztikai Kiválósági Központ keretében valósult meg.”

IRODALOM

- [1] S. Liu, L. G. Papageorgiou: Multiobjective optimisation of production, distribution and capacity planning of global supply chains in the process industry, *Omega* 41 (2013), pp. 369-382.
- [2] Á. Gubán, R. Kása: Service Logistics: Logistification of service processes, *Advanced Logistic Systems: Theory and Practice* 7:(1), (2013), pp. 43-50.
- [3] M. A. Vonderembse et al.: Designing supply chains: Towards theory development, *International Journal of Production Economics* 100, (2006), pp. 223–238.
- [4] J. B. Naylor, M. M. Naim, D. Berry: Leagility: Integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain. *International Journal of Production Economics* 62, (1999), pp. 107–118.
- [5] A. A. Fawaz, R. Jayant: Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study, *International Journal of Production Economics* (2007), pp. 223-236.
- [6] R. R. Fullerton, C. S. McWatters, C. Fawson: An examination of the relationships between JIT and financial performance, *Journal of Operations Management* 21 (4), (2003), pp. 383-404.
- [7] Holweg, M.: The genealogy of lean production, *Journal of Operations Management*, 25 (2), (2007), pp. 420-437.
- [8] M. C. Kocakülâh, J. F. Brown: Lean manufacturing principles and its application in plastics manufacturing, <http://www.decisionsciences.org/org/Proceedings/DSI2008/docs/142-5045.pdf>
- [9] J. P. Womack, D. T. Jones: *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York: Simon & Schuster, (1996)
- [10] J. P. Womack, D. T. Jones, D. Roos: *The Machine that Changed the World: The Story of Lean Production*, New York: Harper Collins Publishers, (1990)
- [11] O. Taiichi: *Toyota Production System. Beyond large-scale production*, Portland, OR: Productivity Press, (1988)

Az AlNiCo és NdFeB mágneses anyagok korróziós viselkedése sósavban

Corrosion Behavior of AlNiCo and NdFeB Magnetic Materials in Hydrochloric Acid

Comportarea corozivă a materialelor magnetice AlNiCo și NdFeB în soluție de acid clorhidric

Dr. PATROI Delia¹, MITREA Sorina¹, LINGVAY Mónika^{2,3}, Dr. LINGVAY József¹

¹Villamosmérnöki Tudományok Nemzeti Kutató Intézete (National Institute for R&D in Electrical Engineering) ICPE-CA, București, Sect. 3., Splaiul UNIRII 313, România, lingvay@icpe-ca.ro www.icpe-ca.ro

²MTA Szegedi Biológiai Kutatóközpont, Növénybiológiai Intézet, Szeged, Magyarország

³Szegedi Tudományegyetem - Fizika Doktori Iskola, Szeged, Magyarország

ABSTRACT

The corrosion behavior in 1% hydrochloric acid solution of AlNiCo (aluminum, nickel and cobalt-based alloys) and the sintered NdFeB-type magnetic materials was investigated in magnetized and not magnetized state. The XRD and SEM microscopy determinations have shown that the investigated materials is homogeneous structured. – the FeCo and AlNi respectively the Nd₂Fe₁₄B and α Fe crystallites is evenly distributed. The gravimetric and XRF determinations showed that the corrosion rate of investigated materials in magnetized state is greater than the in non-magnetized state (AlNiCo - approx. 3 times, NdFeB approx. 4.3 times)..

Key words: Alnico magnets, NdFeB magnets, corrosion, hydrochloric acid

ÖSSZEFOGLALÓ

Az AlNiCo (alumínium, nikkell és kobalt alapú ötvözet) valamint a szinterezett NdFeB típusú mágneses anyagok korróziós viselkedését vizsgáltuk 1%-os sósavoldatban, telítettségig mágnesezett, és nem mágnesezett állapotban. Az XRD és SEM mikroszkópiás meghatározások kimutatták, hogy a megvizsgált anyagok szerkezete homogén – ezekben a FeCo és AlNi, illetve Nd₂Fe₁₄B és α Fe kristalitek egyenletesen oszlanak el. A gravimetriás és XRF meghatározások kimutatták, hogy telítettségig mágnesezett állapotban a megvizsgált anyagok korróziósebessége nagyobb mint nem mágnesezett állapotban (AlNiCo kb. 3-szor, NdFeB kb. 4,3-szor).

Kulcsszavak: Alnico mágnesek, NdFeB mágnesek, korrózió, sósav

1. BEVEZETŐ

Az AlNiCo (alumínium, nikkell és kobalt alapú ötvözet) valamint a szinterezett NdFeB típusú mágneses anyagokat számottevő mennyiségben használnak a legkülönbözőbb ipari alkalmazásokban, de főleg a nagyhatásfokú szinkronmotorokban és generátorokban (pl. szélturbinák generátorai, szervomotorok stb.).

A legtöbb ipari alkalmazásban a mágneses anyagok és a permanens mágnesek korrózió veszélye fennáll. Habár a NdFeB típusú mágneses anyagok sokkal jobb mágneses tulajdonságokkal rendelkeznek [1], aránylag drágák és korróziós ellenálló képességük sokkal gyengébb, mint az AlNiCo anyagoknak [2 – 6].

Mágnesezés után, az AlNiCo valamint a NdFeB típusú anyagok elektrokémiai viselkedése megváltozik, és a korróziós sebességük számottevően megnő [7 – 10].

Ezekre való tekintettel, dolgozatunk célja kísérletileg meghatározni az általunk előállított AlNiCo valamint NdFeB típusú anyagok és permanens mágnesek korróziósebességét 1%-os sósavoldatban, valamint a mágneses paraméterek változását a korrózió hatására.

2. KÍSÉRLETEK – ANYAG ÉS MÓDSZER

AlNiCo típusú Fe 44.7%, Al 17.2%, Co 22.3%, Ni 12.7%, Cu 3.1% (atom) valamint ritkafém alapú Nd 12.27%, Fe 84.01%, B 3.72% (atom) összetételű mágneses anyagokat állítottunk elő és morfológiailag valamint mágnesességi szempontból jellemeztük.

Az előállított anyagok morfológiája SEM mikroszkópiával (Inspect F, FEI típusú berendezéssel) és szerkezetét Röntgendiffrakciós meghatározással (D8 Advance, Bruker típusú berendezéssel) jellemeztük.

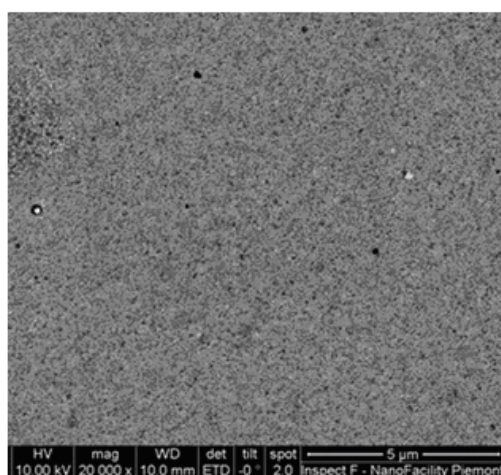
Az előállított anyagokon korróziós (gravimetriás) meghatározásokat (LAB A&D Ltd, N92 típusú analitikus mérleggel) végeztünk 1%-os sósavoldatban ($28 \pm 2^\circ\text{C}$), mágnesezés előtt és mágnesezés után. Az anyagok 10ms impulzusokkal voltak telítettségig mágnesezve.

A használt sósavoldaton X sugár fluoreszcenciás (XRF) meghatározásokat végeztük egy S 8 Tiger (Bruker) típusú berendezéssel.

A mágneses tulajdonságok egy Brockhaus Messtechnik által gyártott AC/DC hisztográffal határoztuk meg.

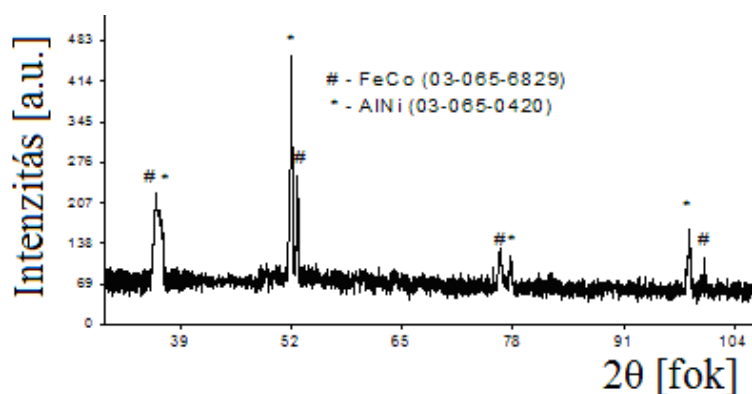
3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS AZOK ÉRTELMEZÉSE

Az előállított Fe 44.7%, Al 17.2%, Co 22.3%, Ni 12.7%, Cu 3.1% (atom) összetételű AlNiCo típusú öntvény SEM mikroszkópiás morfológiáját az 1. ábrán mutatjuk be, amelyből megállapítható, hogy a kapott anyag szerkezete homogén, amelyben a FeCo és AlNi kristalitok (2. ábra) egyenletesen oszlanak el.



1. ábra

Az előállított AlNiCo mágneses anyag SEM mikroszkópiás morfológiája



2. ábra

Az előállított AlNiCo mágneses anyag Röntgendiffrakciós diagramja

A 3. ábrán az AlNiCo mágneses anyag fényképeit mutatjuk be sósavas kezelés előtt és 24 órás 1%-os sósavoldatba való merítés után – nem mágnesezett, és mágnesezett állapotban.

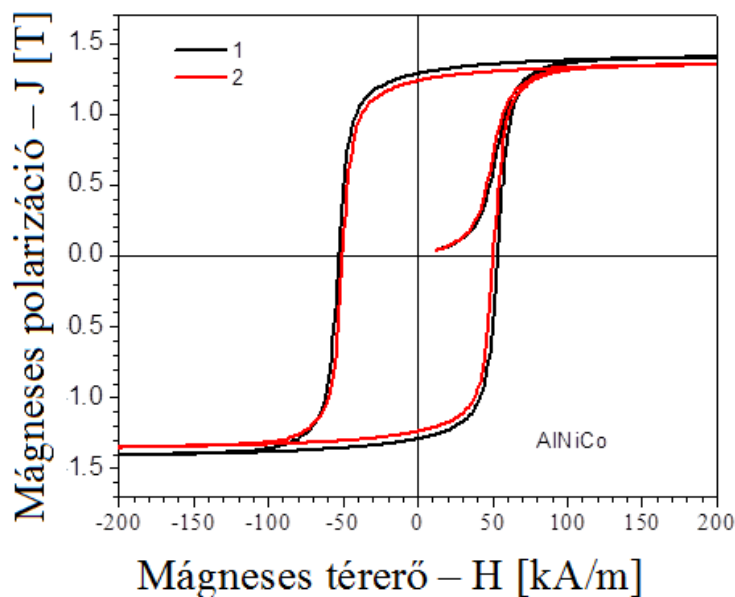


3. ábra

Az AlNiCo próba fényképe sósavas kezelés előtt (a) és után, nem mágnesezett (b) és mágnesezett (c) állapotban

A 3. ábra fényképeiből megállapítható, hogy a sósavas kezelés következtében a próbák felülete megváltozik – a nem mágnesezett (b) próbán pácolás nyomai látszanak és a mágnesezett (c) próba felülete oxid-jellegű korróziós termékkel van bevonva. Ez arra utal, hogy a mágnesezett állapot megváltoztatja az AlNiCo ötvény és a sósavoldat között végbemenő korróziós folyamatok mechanizmusát és kinetikáját.

Az AlNiCo ötvözet mágneses jellemzői, sósavas kezelés előtt és után a 4. ábrán mutatjuk be, amelyből megállapítható, hogy a sósavas kezelés következtében az ötvözet mágneses jellemzőinek az értékei – a mágneses polarizáció és a mágneses térerő kb. 8%-al kisebbek.



4. ábra

*Az előállított AlNiCo mágneses anyag mágneses jellemzése:
1 – sósavas kezelés előtt; 2 – sósavas kezelés után*

Az AlNiCo ötvözetten végzett gravimetriás meghatározások 24 órás 1%-os sósavoldatba való merítés után ($28 \pm 2^\circ\text{C}$), nem mágnesezett állapotban 0,0149 g, mágnesezett állapotban 0,0445 g tömegvesztést mutattak ki, ami arra utal, hogy mágnesezett állapotban az AlNiCo ötvözet korróziósebessége kb. 3-szor nagyobb, mint nem mágnesezett állapotban. A használt sósavoldatokon végzett XRF meghatározások eredményeit az 1. táblázatban adjuk meg.

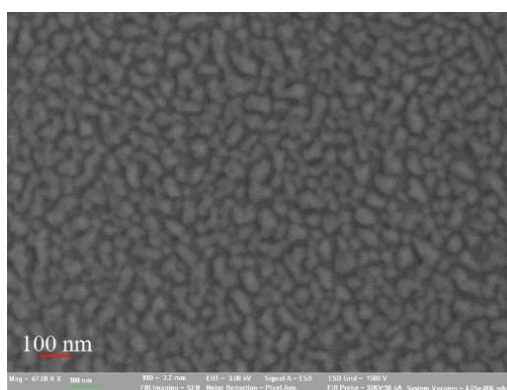
1. Táblázat

Az AlNiCo ötvözetnél használt sósavoldatokon végzett XRF meghatározások eredményei

Próba	Elem [%]		
	Cl	Fe	Co
Merítés előtt (referencia)	0,351	0,0004	–
Nem mágnesezett próba (24 óra merítés után)	0,349	0,0371	–
Mágnesezett próba (24 óra merítés után)	0,343	0,0831	0,0279

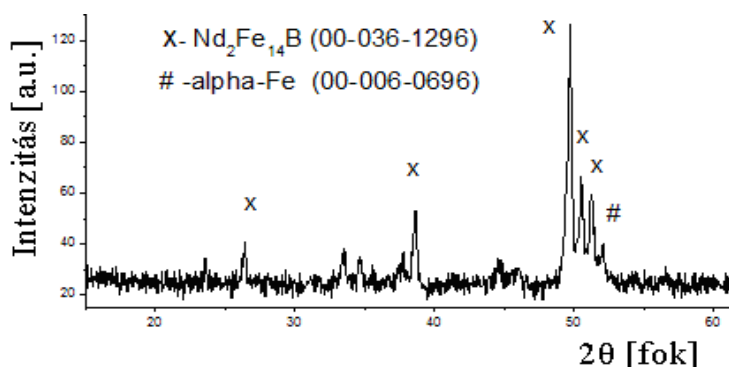
Az 1. táblázat adataiból megállapítható, hogy nem mágnesezett állapotban, az 1%-os sósavoldatba merített AlNiCo mágneses ötvözetből, $28 \pm 2^\circ\text{C}$ -on, csak a vas oldódik ki. Tekintettel arra, hogy a próba 40 ml sósavoldatba volt merítve, melynek a meghatározott vastartalma 0,0004%, kiszámítható, hogy a használt oldat a 24 óra leforgása alatt a próbából kb. $40 \cdot (0,0371 - 0,0004)/100 = 0,01468$ g vasat oldott ki. Ez a számított érték a gravimetriás meghatározáshoz képest (0,0149 g) mindössze 0,00022 g eltérést mutat. Ugyancsak megállapítható, hogy a telítettség mágnesezett AlNiCo ötvözet esetében a sósavoldatba való merítés közben nem csak a vas, hanem számottevő kobalt mennyiség is oldódik (0,0279% Co a sósavoldatban), a kioldott vas és kobalt tömegaránya kb. $\text{Fe}/\text{Co} = 0,0831 : 0,0279 = 2,978$, azaz kb. 3 – tehát a mágnesezett ötvözetből kb. 3-szor több vas oldódik ki mint kobalt. A mágnesezett ötvözet esetében is kiszámítható, hogy a próbából kb. $40 \cdot (0,0831 - 0,0004)/100 = 0,03308$ g vas és $40 \cdot 0,0279/100 = 0,01116$ g kobalt oldódott ki – összesen 0,04424 g, ami a gravimetriás meghatározáshoz képest (0,0445 g) mindössze 0,00026 g eltérést mutat.

Az előállított ritkafém alapú Nd 12,27%, Fe 84,01%, B 3,72% (atom) szinterezett mágneses anyag SEM mikroszkópiás morfológiáját az 5. ábrán mutatjuk be, amelyből megállapítható, hogy a kapott anyag szerkezete homogén, amelyben a $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ és az α Fe kristallitok (6. ábra) egyenletesen oszlanak el.



5. ábra

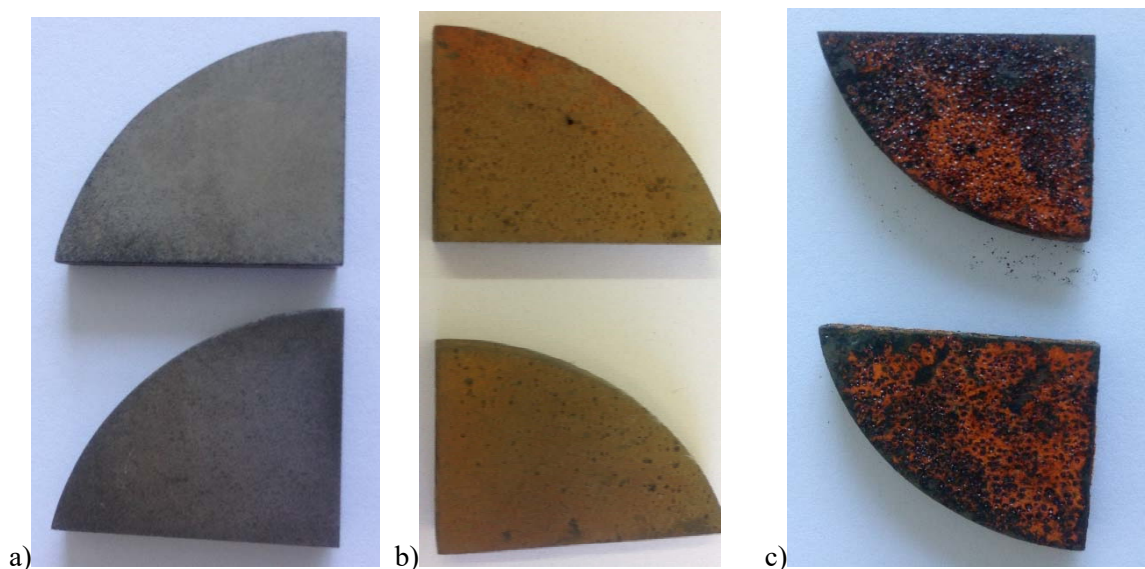
Az előállított NdFeB mágneses anyag SEM mikroszkópiás morfológiája



6. ábra

Az előállított NdFeB mágneses anyag röntgendiffrakciós diagramja

A 7. ábrán az NdFeB mágneses anyag fényképeit mutatjuk be sósavas kezelés előtt és 24 órás 1%-os sósavoldatba való merítés után – nem mágnesezett, és mágnesezett állapotban.

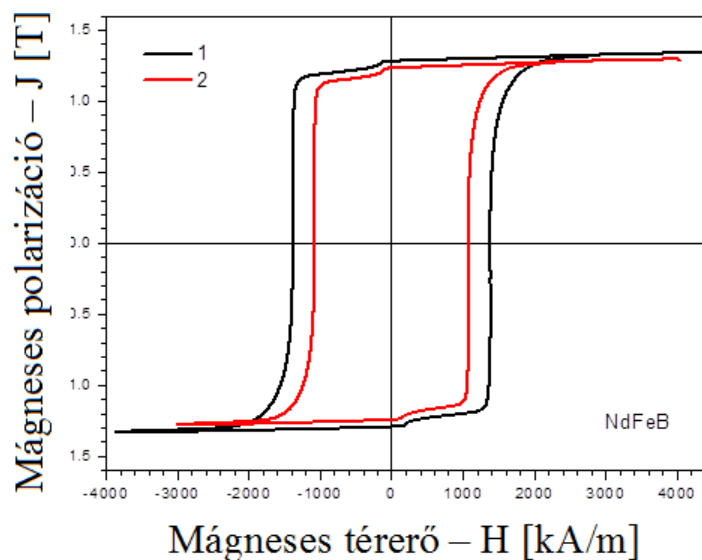


7. ábra

A szinterezett NdFeB próbák fényképei sósavas kezelés előtt (a) és után, nem mágnesezett (b) és mágnesezett (c) állapotban

A 7. ábra fényképeiből megállapítható, hogy a 24 órás sósavoldatos kezelés következtében a próbák felülete megváltozik – a nem mágnesezett (b) próba egy aránylag homogén, oxidjellegű korróziós termékkel van bevonva és a mágnesezett (c) próbán heterogén, oxidjellegű korróziós termékek valamint aránylag mély korróziós bemaródások láthatók. Ez arra utal, hogy a mágnesezett állapot megváltoztatja a NdFeB mágneses anyag és a sósavoldat között végbemenő korróziós folyamatok mechanizmusát és kinetikáját.

A szinterezett NdFeB anyag mágneses jellemzőit, sósavas kezelés előtt és után a 8. ábrán mutatjuk be, amelyből megállapítható, hogy a sósavas kezelés következtében az ötvözet mágneses jellemzői számottevően megváltoznak (a mágneses polarizáció kb. 10%-al és a mágneses térerő kb. 25%-al kisebb)



8. ábra

*Az előállított NdFeB szinterezett anyag mágneses jellemzése:
1 – sósavas kezelés előtt; 2 – sósavas kezelés után*

A szinterezett NdFeB anyagon végzett gravimetriás meghatározások, 24 órás 1%-os sósavoldatba való merítés után ($28\pm 2^{\circ}\text{C}$), nem mágnesezett állapotban 0,0599 g, mágnesezett állapotban 0,2592 g tömegveszté-
séget mutattak ki, ami arra utal, hogy mágnesezett állapotban a szinterezett NdFeB korróziósebessége kb. 4,3-
szor nagyobb, mint nem mágnesezett állapotban. A használt sósavoldatokon végzett XRF meghatározások
eredményeit az 2. táblázatban adjuk meg.

2. Táblázat

A szinterezett NdFeB anyagnál használt sósavoldatokon végzett XRF meghatározások eredményei

Próba	Elem [%]		
	Cl	Fe	Nd
Merítés előtt (referencia)	0,351	0,0004	–
Nem mágnesezett próba (24 óra merítés után)	0,349	0,096	0,052
Mágnesezett próba (24 óra merítés után)	0,343	0,491	0,154

A 2. táblázat adataiból megállapítható, hogy nem mágnesezett állapotban, az 1%-os sósavoldatba merít-
ett szinterezett NbFeB anyagból, $28\pm 2^{\circ}\text{C}$ -on, csak a vas és a neodímium oldódik ki. Tekintettel arra, hogy a
próba 40 ml sósavoldatba volt merítve, melynek a meghatározott eredeti vastartalma 0,0004%, kiszámítható,
hogy a használt oldat a 24 óra leforgása alatt a próbából kb. $40 \cdot (0,096 - 0,0004)/100 = 0,03824$ g vasat és
 $40 \cdot 0,052/100 = 0,0208$ g neodímiumot oldott ki – összesen 0,05904 g. Ez a számított érték, a gravimetriás
meghatározáshoz képest (0,0599 g) mindössze 0,00086 g eltérést mutat. Ugyancsak megállapítható, hogy a
telítettségig mágnesezett szinterezett NbFeB anyag esetében, a sósavoldatba való merítés közben az oldott Fe
és Nd mennyiség számottevően megnő – az oldott vas 0,19624 g (kb. 5-ször több mint a nem mágnesezettnél)
és az oldott neodímium 0,06169 g (kb. 3-szor több mint a nem mágnesezettnél). Ezek a számított értékek (öss-
zesen 0,25793 g) a gravimetriás meghatározáshoz képest (0,2592 g) aránylag nagy, 0,00127 g eltérést mutat-
nak, ami azzal magyarázható, hogy az oxidjellegű korróziós termékek egy része a próbán maradt (7. ábra).

4. KÖVETKEZTETÉSEK

AlNiCo típusú ötvözet és szinterezett NdFeB mágneses anyagok morfológiáját (SEM mikroszkópiás
meghatározások), szerkezetét (XRD – Röntgendiffrakciós meghatározások), mágneses tulajdonságaik (mág-
neses polarizáció / mágneses térerő) és korróziós viselkedésüket 1%-os sósavoldatban (gravimetriás es XRF
meghatározások) vizsgáltuk.

A kísérleti adatok kimutatták, hogy:

- a megvizsgált anyagok szerkezete homogén, amelyben a FeCo és AlNi kristalitik (AlNiCo), illet-
ve a $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ és az α Fe kristalitik (NdFeB) egyenletesen oszlanak el;
- 1%-os sósavoldatban, $28\pm 2^{\circ}\text{C}$ -on, a nem mágnesezett AlNiCo ötvözetből csak a vas oldódik, vi-
szont mágnesezett állapotban a vas és a kobalt is oldódik és a globális korróziósebesség
(tömegvesztesség/24 óra) számottevően (kb. 3-szor) megnő;
- 1%-os sósavoldatban, a szinterezett NdFeB anyagból a vas és a neodímium oldódik, mágnesezett
állapotban kb. 4,3-szor gyorsabban, mint nem mágnesezett állapotban;
- a korrózió hatására a megvizsgált anyagok mágneses jellemzői romlanak;
- a szinterezett NdFeB mágneses jellemzői sokkal jobbák (mágneses térerő kb. 20-szor nagyobb)
mint az AlNiCo ötvözeté;
- szinterezett NdFeB korróziósebessége 1%-os sósavoldatban, $28\pm 2^{\circ}\text{C}$ -on sokkal nagyobb (nem
mágnesezett állapotban kb. 4-szer és mágnesezett állapotban kb. 5,8-szor) nagyobb, mint az
AlNiCo ötvözeté;
- a korrózió hatására (24 óra, 1%-os sósavoldatban, $28\pm 2^{\circ}\text{C}$ -on) a szinterezett NdFeB mágneses tér-
ereje kb. 25%-al csökken, viszont az AlNiCo mágnes esetében a csökkenés sokkal kisebb (kb. 8%).

A fentiekre való tekintettel megállapítható, hogy habár a NdFeB mágneses jellemzői sokkal jobbák, a
korróziósnak sokkal kevésbé áll ellen, mint az AlNiCo mágnes. Ugyancsak megállapítható, hogy a NdFeB
mágneses jellemzői a korrózió hatására sokkal jobban romlanak, mint az AlNiCo mágnes esetében.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] O. Gutfleisch, M.A. Willard, E. Brück, C.H. Chen, S.G. Shankar, J.P. Liu: Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. *Adv. Mater.* 2011. **23**, 821–842.
- [2] N. Yogal, C. Lehrmann: Study of Magnetic Properties on the Corrosion Behavior and Influence of Temperature in Permanent Magnet (Nd-Fe-B) Used in PMSM. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering* 2014. **8**. (11) 1592 – 1596
- [3] W. Kappel, M. M. Codescu, N. Stancu, D. Popa: Evaluation of the corrosion behaviour for the permanent magnets based on rare earths, used in aeronautical industry. *Journal of optoelectronics and advanced materials*, 2006. **8**. (2) 523 – 525
- [4] M. M. Codescu, W. Kappel, M. Dumitrache, D. Popa: Corrosion tests on alloys and permanent magnets based on NdFeB, used in aerospace industry, *Journal of optoelectronics and advanced materials*. 2008. **10**. (4) 790 – 793
- [5] Kalyan Chitrada, Krishnan S. Raja, Batric Pesic, Indrajit Charit: Corrosion Behavior of Surface Modified NdFeB Permanent Magnet in Dilute Chloride Environments. *Electrochimica Acta* 2014. (123) 23–32
- [6] E. Isotahdon, E. Huttunen-Saarivirta, S. Heinonen, V.-T. Kuokkala, M. Paju: Corrosion mechanisms of sintered Nd–Fe–B magnets in the presence of water as vapour, pressurised vapour and liquid. *Journal of Alloys and Compounds* 2015. (626) 349–359
- [7] C. Gaona-Tiburcio, F. Almeraya-Calderón, J.G. Chacon-Nava, J.A. Matutes-Aquino, A. Martinez-Villafañe: Electrochemical response of permanent magnets in different solutions. *Journal of Alloys and Compounds*. 2004. (369) 78–80
- [8] R. Sueptitz, K. Tschulik, M. Uhlemann, M. Katter, L. Schultz, A. Gebert: Effect of magnetization state on the corrosion behaviour of NdFeB permanent magnets. *Corrosion Science*. 2011. **53**. 2843–2852
- [9] Elena Radu, Delia Patroi, Gabriela Oprina, Andreea Voina, Iosif Lingvay, Comparative Studies on *Aspergillus niger* Biocorrosion of Alnico and NdFeB Magnetic Materials, *REV.CHIM.(Bucharest)* Vol. 67 (10) 2016. pp. 1973-1978
- [10] Gánóczy József: Rendhagyó (?) korrózió – Amikor a vegyileg ellenálló acél mégsem korrózióálló. 2010. (5-6) pp. 133-137.

A búza (*Triticum aestivum* L.) összesszelén-tartalma és a talaj típusa közötti összefüggés

Correlation Between the Total Selenium Content of the Wheat Seeds and the Soil Types

Relația dintre conținutul de seleniu total al grâului (*Triticum aestivum* L.) și tipul solului

Dr. TAMÁS Melinda¹, Prof. Dr. CSAPÓ János^{1,2}

¹SAPIENTIA EMTE Kolozsvár, Csíkszeredai Kar, Élelmiszer-tudományi Tanszék, RO-4100 Csíkszereda, Szabadság tér 1., Tel.: 40-266-314-657, fax: 40-266-372-099; tamasmelinda@cs.sicorum.ro, www.emte.ro

²Debreceni Egyetem, Mezőgazdaság-, Élelmiszer-tudományi és Környezetgazdálkodási Kar, HU-4032 Debrecen, Böszörményi út 138. Tel/Fax: 36-30-52-417-572; csapo.janos@gmail.hu, www.mek.unideb.hu

ABSTRACT

During our research work we investigated the connection between the total selenium content of the wheat seeds and 16 soil types in two regions (Dobrogea-Baragan region in 2008, and in the Ciuc basin in 2010). The average total selenium content of the wheat seeds in the Dobrogea-Baragan region was 72.9 µg/kg in 2009, and 101 µg/kg in 2009, and 82.9 µg/kg in 2010 in Ciuc basin. In the case of the selenium content of wheat seed samples, it can be concluded that the lowest values were measured in each year when the wheat grass samples were cultivated regosol (30.2 µg/kg in 2008, 58.2 µg/kg in 2009 and 34.8 µg/kg in 2010), while the highest values were obtained when the wheat grass samples were cultivated on mollic (typical or litic chernozem) soil (109 µg/kg in 2008, 133 µg/kg in 2009 and 121 µg/kg in 2010). The correlation between the wheat samples collected from the same soil type of the both region very strong correlation was obtained both in 2008-2009 and 2008-2010, because the correlation coefficient was 0.829 in 2009 and 0.906 in 2010. We examined the correlation between the selenium content of wheat seeds collected always from the same places of the Ciuc basin in 2009 and 2010. According to the results, the correlation coefficient was 0.896, which means a strong correlation. The order of the total selenium content of wheat seeds was the same both in Dobrogea-Bărăgan region and in Ciuc basin regardless of the place of origin. It can be concluded that the selenium content of the soil, regardless of the region, define significantly the selenium content of the wheat seeds. The structure and the type of the soil, in addition to the weather conditions, can play important role in the storage of selenium in wheat seeds.

Keywords: type of soil, wheat, total selenium content

ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkánk során két régióban (Dobrogea-Bărăgan vidékén - 2008-ban és a Csíki-medencében 2009-ben és 2010-ben) vizsgáltuk 16 talajtípust és a talajokon termelt búzámagok összesszelén-tartalma közötti összefüggést. A búzámag minták összesszelén-tartalma a Dobrogea-Bărăgan vidékén átlagosan 72,9 µg/kg, a Csíki-medencében 2009-ben 101 µg/kg, míg 2010-ben 82,9 µg/kg volt. A legalacsonyabb szeléntartalmat a földes kopár talajról származott búzáminta (2008-ban: 30,2 µg/kg; 2009-ben: 58,2 µg/kg; 2010-ben: 34,8 µg/kg) esetén mértük, míg a legnagyobb értéket a mollikus (litikus csernozjomszerű) (2008-ban: 109 µg/kg; 2009-ben: 133 µg/kg; 2010-ben: 121 µg/kg) talajnál találtunk. A két vidék azonos talajáról származó búzámagok szeléntartalma között mind 2008-2009, mind 2008-2010 vonatkozásában igen szoros összefüggést kaptunk, hisz az R értéke 0,829 (2009) és 0,907 (2010) volt. A Csíki-medence 2009-2010-es évjáratát összehasonlítva, ugyancsak rendkívül szoros összefüggést találtunk az ugyanarról a talajtípusról és talajról származó búzámagok összesszelén-tartalma esetében (R=0,896). Mind a Dobrogea-Bărăgan vidék, mind a Csíki-medence talajtípusain termelt búzámag minták esetében, azonos talajtípusnál, a származási helytől függetlenül

nül, ugyanazt a sorrendet kaptuk, a búzamag minták összesszelén-tartalmát illetően. Levonhatjuk tehát azt a következtetést, hogy a talaj Se-tartalma, tájegységtől függetlenül, szignifikáns mértékben megszabja a búzamag szeléntartalmát. Az időjárási körülmények mellett a talaj szerkezete és típusa fontos szerepet játszhat a szelén búzamagban való elraktározódásában.

Kulcsszavak: talajtípus, búza, összesszelén-tartalom

1. BEVEZETÉS

A szelén esszenciális mikroelem, de élettani hatása ambivalens. Hiánya több betegség kialakulásához vezethet, ugyanakkor egy másik egészségügyi kockázatot jelenthet a szelénszennyezés, mivel a szelén egyike azoknak az elemeknek, amely nagyon szűk tolerancia tartománnyal jellemezhető.

A felnőtt szervezet napi szelén szükséglete 0,12 mg. Ezt a mennyiséget a táplálékkal abban az esetben lehet biztosítani, ha a növények képesek a talajból megfelelő mennyiségű szelént felvenni.

A mezőgazdasági termelés iparszerű elterjedésével összefüggésben világszerte (így Európában, azon belül Romániában és Magyarországon is) felborultak, egyirányúvá váltak a tápanyag-visszapótlási ciklusok.

Az elmúlt 50 évben világszerte felismerték, hogy az emberi egészség fenntartása érdekében nagyon fontos lenne, hogy az alapvető élelmiszereinkben (köztük a búzamagban, és a belőle készült lisztekben) megfelelő mennyiségben legyenek jelen olyan létfontosságú mikroelemek, mint a szelén. A szelént az 1800-as évek elején fedezték fel, de az elmúlt 50 évben lett fontos szerepe a mikroelem kutatásokban, mivel bizonyossá vált, hogy számos olyan fehérje és enzim aktív centrumában jelen van, amelyeknek fontos szerepük van az emberi szervezetben.

Nagyon fontos lenne tehát, hogy a termőtalajok, és a rajtuk termesztett olyan alapvető élelmiszerek, mint a búza szeléntartalmával, illetve szelénfelvételével mindenhol tisztában legyünk.

A savas esők hatására a talajban lévő szelénvegyületek olyan formába alakulnak át, amelyekből a növények csak kis mennyiséget képesek felvenni.

A szelén oxidációs állapottól függő módosulatait a talajban nagymértékben befolyásolják a pH, a talaj szerkezete, környezeti állapota, a vas-oxid és a vas-hidroxid aránya, valamint a szervesanyagok, a talaj mikrobiális tevékenységek, illetve más faktorok. A talaj pH-ja, a talaj szerkezete, a vas-oxid és a vas-hidroxid aránya, valamint a szervesanyagok szignifikáns hatással vannak a növények szelénfelvételére (Gissel-Nielsen és mtsai., 1984; Barrow és Whelan, 1989).

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A szelén szerepe az emberi táplálkozásban – a szelénhiány következményei

Embernél két betegséget hoztak kapcsolatba a szelénhiánnyal. Ilyen a szívizom megbetegedés, a Keshan-kór (endémiás cardiomyopathia) és a súlyos ízületi megbetegedés, a Kashin-Beck-betegség (krónikus osteochondropatia). A Keshan-kór a gyerekeknél és a fogamzóképes nőknél fordul elő, amely Kína északkeleti és dél-nyugati tartományai között, a talajviszonyoknak megfelelően, különböző mértékben mutatkozik. Azokra a tartományokra, ahol a betegség előfordul, a talaj alacsony felvehető szeléntartalma a jellemző, melynek következtében az ott termesztett élelmiszer alapanyagok szelénkoncentrációja rendkívüli mértékben alacsony (Combs, 2001; FAO, WHO, 2001; Tan és Huang, 1991).

Boldery és mtsai. (2006) szerint a vitaminok és ásványi anyagok hiányát már a múlt század 30-as éveiben kapcsolatba hozták a kardiomiopátiás megbetegedésekkel. (A kardiomiopátia (CMP) a szív pumpafunkciójának gyengüléséhez vezető szívbetegségek összefoglaló neve, amely az izom saját betegségére vezethető vissza.)

A szelénről egyre többen rákellenes hatást is kimutattak (Combs, 2005; Combs, 2001; Whanger, 2004). Az Amerikai Egyesült Államokban a táplálkozásban használt magok szeléntartalma és a halálos rák megbetegedések között negatív összefüggés figyelhető meg (Clark és mtsai, 1991).

Rasmussen és mtsai. (2009) Dániában vizsgálták a szérum összesszelén- és szeleno-metionin-tartalmának változását nyolc év alatt, különös tekintettel azokra a hatásokra, amelyek a szelénstátusszal kapcsolatba hozhatók. 817 véletlenszerűen kiválasztott egyéntől vettek vérmintát, és egy kérdőívvel információt szereztek a dohányzási szokásokról, az alkoholfogyasztásról és a sportolásról. A férfiaknál az átlagos szérum szelén szint 98,7 µg/l, a szeleno-protein szint pedig 2,72 mg/l volt. Mind a szérum szelén szintje, mind a szeleno-protein szintje a kor előrehaladásával nőtt, és a szeleno-protein szint magasabb volt a férfiaknál, mint a nőknél. A szérum szelén szintje 1997–2005 között mintegy 5%-kal csökkent, ezzel szemben a szeleno-

protein szint szignifikánsan növekedett. A halfogyasztás csak nagyon csekély mértékben volt hatással a szelén szintre, és egyáltalán nem befolyásolta a szeleno-protein szintet. A dohányzás, az alkoholfogyasztás, a testgyakorlás vagy a gyógyszerfogyasztás nem befolyásolta a szervezet szelénstátuszát. Megállapították, hogy a dán populáció szelénstátusza megfelelő szintű. A kor, a nem és az életstílus szerint nem tudtak olyan csoportokat kiemelni, amelyeknél különös figyelmet kellene fordítani a szelénhiányra.

2.2. Szelénformák

Természetes körülmények között a biológiailag nem hozzáférhető elemi szelén csak ritkán fordul elő, de a talajban stabilis formában megtalálható.

Az elemi szelén szelén-dioxiddá oxidálódhat, mely leginkább a talaj felszínén fordulhat elő. Levegőtől elzárt, anaerob körülmények között, a talajokban a szelén elemi formája van jelen (Craig, 1986).

A környezetünkben előforduló főbb szelénvegyületek:

- a talajban: Se(IV), Se(VI), dimetil-szelenid (dMeSe), dimetil-diszelenid (dMedSe) $((\text{CH}_3)_2\text{Se}_2)$, dimetil-szelenon $((\text{CH}_3)_2\text{SeO}_2)$,
- biológiai mintákban: szeleno-cisztin (SeC), szeleno-cisztein, szeleno-metionin, szeleno-etionin (SeE), szeleno-urea (SeU).

2.3. A szelén a talaj-növény rendszerben

A talaj pH-ja, a talaj szerkezete, a vas-oxid és a vas-hidroxid aránya, valamint a szervesanyagok szignifikáns hatással vannak a növények szelénfelvételére (Gissel-Nielsen és mtsai., 1984; Mikkelsen és mtsai., 1989).

A növények a szelént szelenát, szelenit és szerves formában egyaránt képesek felvenni. Zayed és mtsai. (1998) vizsgálatai szerint a növények levelei akkor akkumulálják a legnagyobb mennyiségű szelént, ha az szelenát formában van jelen a talajban.

A nem Se-indikátor növények a felvett szelént nagyrészt SeMet formába alakítják át, majd fehérjékbe építik be a metionin helyére. A talaj szerves anyagaihoz kötött szelén nem mobilis, csak egyes indikátor növényfajok képesek felvenni azt. Ezek a növényfajok viszont egyúttal Se-transzformátoroknak is tekinthetők, mivel pusztulásuk és a talajban való lebomlásuk után kiváló Se-forrásul szolgálnak más növények számára. A talajtulajdonságok megváltozásával (pl. elsavanyodás) a talajban az egyes szelénformák átalakulhatnak egymásba (Kádár, 1998), a talajok elsavanyodása során ugyanis a talajban levő magasabb oxidációs fokú szelénformák nem vízoldékonyak, így a növények számára felvehetetlen elemi szeléné és szeleniddé redukálódnak. Az anaerob baktériumok által végzett biológiai metiláció következtében az illékony vegyületekké (pl. dimetil-szeleniddé) átalakult szelén el is távozhat a talajból, jellegzetes fokhagyma szagot árasztva (Pyrzynska, 2002). A légkörből kimosódó szelén viszont 1-2 g/ha/év mennyiségben akár növelheti is a talajok Se-tartalmát (Kádár, 1998).

A szelenátok kevésbé kötődnek meg a döntően negatív töltésű talajkolloidokon, ezért könnyen kimosódhatnak. Így például a vulkáni talajok kilúgozása következtében az ilyen termőhelyen élő növények Se-tartalma is rendkívül alacsony.

Magyarországon Patócs (1990) és Gondi (1991) vizsgálatai szerint a szelénhiányos területek a savanyú talajokhoz köthetőek, ahol mind a talajok mobilis Se készlete, mind pedig a növények Se-tartalma alacsony. Mivel itt a talajok nagy része a szántott rétegben savanyú, és az elsavanyodás az elmúlt évtizedekben előrehaladt, a közeljövőben a Se-hiány növekedésével kell számolni.

A talaj- és növényvizsgálati eredmények együttes értékelése szerint Magyarország termőhelyeinek 20%-a esett az alacsony ellátottsági tartományba, míg 80%-a többé-kevésbé megfelelőnek minősült. A megfelelő vagy „kielégítő” ellátottság a nemzetközi átlaghoz való relatív viszonyt takart, nem élettani optimumokat. A magyarországi növényminták Se-tartalma valójában a nemzetközi középmezőny alsó harmadában, míg a talajok mobilis Se-készlete a középmezőnyben helyezkedett el (Kádár, 1995, 2012).

Összefoglalóan megállapítható, hogy Se-hiányos területek Magyarországon a savanyú talajokhoz kötődnek, ahol mind a talajok mobilis Se-készlete, mind a növények szeléntartalma alacsony, melyet a FAO vizsgálatok is igazoltak. Mivel Magyarország talajaink fele a szántott rétegben savanyú, és az elsavanyodás előrehaladt az elmúlt évtizedekben, a Se-hiány növekedésével lehet számolni a jövőben (Kádár, 2012).

Lăcătușu és mtsai (2012) szoloncsák és szolonyec talajok szeléntartalmát vizsgálták, Románia dél-keleti részén található Buzăuban a Călămatui folyó mentén. Vizsgálataik során a talaj összesszelén-tartalma 480 és 1140 $\mu\text{g}/\text{kg}$ között változott, átlagos értéke 800 $\mu\text{g}/\text{kg}$ volt. Ez az érték 2,1-szer nagyobb, mint a talajok átlagos szeléntartalma, a Dobrogeai talajokhoz viszonyítva pedig 3-4-szer nagyobb. Ezeket az értékeket a folyó mellett található talajok fizikai és kémiai tulajdonságaival magyarázták.

Luguanu és mtsai (2013) (Románia) a talajban található kioldható szelén arányát vizsgálták az

összesszelén-tartalomhoz viszonyítva, amely 3,57 és 8,15% között mozgott. Ezeket az értékeket a talaj szennyezettségével, kálium, nitrogén, foszfor, humusztartalmával magyarázták.

Lăcătușu és mtsai (2013) Románia déli részén található Olténiában, hat helyszínen vizsgálták a talajok fizikai-, kémiai tulajdonságait és szeléntartalmát. Az összesszelén-tartalom ezeken a talajokon 0,20 µg/kg és 190 µg/kg között változott, az átlag érték 97 µg/kg, volt.

2.4. A különféle talajokon termesztett búza szeléntartalma

A gabonák és gabonákból készült termékek eltérő mértékben tartalmaznak szelént. Szeléntartalmuk az eredeti anyagban 10–550 µg/kg között változik (FAO, WHO, 2001). Az étkezési minimum mind az ember, mind az állat számára 50–100 µg Se/kg szárazanyag, amely bevitel alatt szelénhiány fordul elő (Gissel-Nielsen és mtsai., 1984).

Lăcătușu és mtsai. (2010) búzanövények és búzamazgok szeléntartalmát elemezték Romániában délkelet-Alföld és Közép- és Dél-Dobrudzsa talajain. A vizsgálataik során nagyon eltérő szeléntartalmat találtak. A búzaszemek, búzanövények szeléntartalma a román Alföldön megközelítette a normális (75-150 µg/kg) értéket, míg Közép- és Dél-Dobrogeában 0,5 mg/kg körüli értéket is kaptak. Az eredmények alapján javasolták a liszt szeléndúsítását, vagy más, szelénrel gazdagabb búzából származó liszttel való keverését.

3. A KUTATÁS CÉLJA

Mivel Románia lakossága szelén ellátottságára, a talajról és ezen a talajokon termelt búzamazg szeléntartalma vonatkozásában nagyon hiányosak az ismeretink, ezért célul tűztük ki, hogy megvizsgáljuk:

Dobrogea-Bărăgan vidékén és a Csíki medencében (Hargita megye) található legfontosabb talajtípusok (földes kopár talaj, hidromorf (pangóvízes talaj), podzolosodott barna erdőtala, kambikus (barna erdőtalaj), lepusztult talaj (erodiszol), nyers öntéstalaj-protoszol, hidromorf (szürke réti talaj), mollikus (rendzinák), humuszos öntéstalaj, homoktalaj-pszamoszol, kambikus (barnaföldek), agyagbemosódásos barna erdőtalaj, albius barna erdőtalaj, hidromorf (fekete réti talaj), mollikus (litikus csernozjomszerű) és mollikus (típusos csernozjomszerű) talaj) összesszelén-tartalmát, valamint

Dobrogea-Bărăgan vidékén és a Csíki-medencében található legfontosabb 16 talajtípus és a rajtuk termelt búzamazgok összesszelén-tartalma közötti összefüggést.

4. ANYAG ÉS MÓDSZER

4.1. A búza típusa, jellemzői

Kutatómunkánk során a kenyérbúza (*Triticum aestivum* L.) szeléntartalmának és szelénformáinak meghatározását végeztük el, mivel ez a legelterjedtebb búzafajta, amelyet természetesen mind Dobrogea és a Bărăgan vidékén, mind a Csíki-medencében. Ez a búzafajta az egyszikűek (*Liliopsida*) osztályának a perjevirágúak (Poales) rendjébe, ezen belül a perjefélék (Poaceae) családjába tartozó faj, mely a búzafajok és fajták változatos éghajlati igénye és jó alkalmazkodóképessége miatt széles körben elterjedt.

A Föld egyik legnagyobb területen előforduló gabonája, a sivatagok és a sarkvidékek kivételével szinte mindenütt termesztik. A népelemezésben elfoglalt szerepével kiemelkedik a többiek közül. Kenyérgabona szerepén túl sokrétű felhasználás jellemzi, hiszen gazdag abrakanyag, szalmája értékes alomány, és különböző részei ipari alapanyagként is felhasználhatóak.

4.2. Szeléntartalom meghatározása fluorometriás módszerrel

A szeléntartalom rendkívül érzékeny a roncsolási körülményekre, ezért nedves roncsolással végeztük a feltárást. A roncsolást elvégeztük mind salétromsavval, mind pedig királyvízzel, de a salétromsavas roncsolás esetén is megfelelő eredményeket kaptunk a talaj és a búzamazg esetében, így ezt a roncsolási módszert alkalmaztuk.

Az elroncsolt oldatból a szeléntartalmat a roncsolást követően piaszelenol-komplex kialakítása után fluorimetriásan határoztuk meg. A fluorometriás mérés során a gerjesztési hullámhossz 380 nm, a mérési hullámhossz 519 nm volt.

Kalibrációs görbét készítettünk, melynek során a mért emisszióértéket ábrázoltuk a hozzájuk tartozó szeléntartalom függvényében. A 0,2-1,0 µg/cm³ tartományban a görbe lineáris, melyek segítségével a minta szeléntartalma a következő képlettel számolható:

$$C = \frac{\text{bemért anyag mennyisége}}{\text{extrahálóoldat mennyisége}} \cdot C_M$$

ahol: C_M a mért koncentráció, $\mu\text{g}/\text{cm}^3$

C a minta szeléntartalma, $\mu\text{g}/\text{g}$

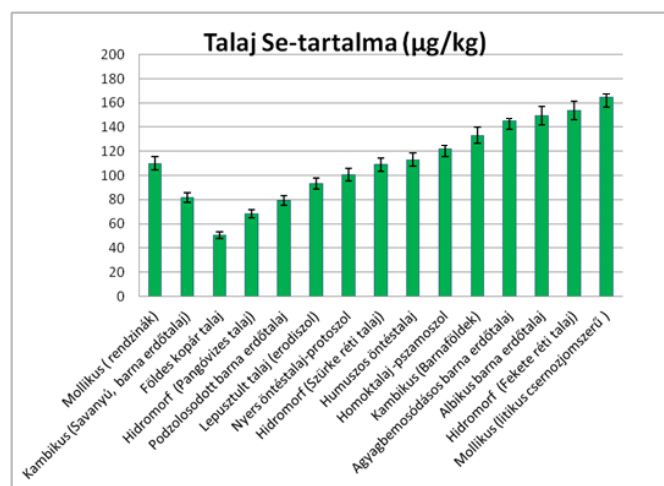
4.3. Az adatok statisztikai értékelése

Az adatokból Microsoft Office Excel, 2003 és SPSS for Windows 17.0 statisztikai programcsomagok (szórás, átlag, korrelációs számítás) segítségével végeztük el a statisztikai analíziseket annak eldöntésére, hogy a talaj-, a búza szeléntartalma és a talajok típusa között milyen összefüggések vannak.

5. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

5.1. A talajminták vizsgálata

A kutatásunk kezdetekor, amely Románia dél-keleti részén elhelyezkedő Dobrogea és Bărăgan vidékén történt, meghatároztuk 16 talajtípust és az ott termesztett búza és búzánövény szeléntartalmát.



1. ábra

A talajminta szeléntartalma a begyűjtés sorrendjében, különböző talajtípusok esetében Dobrogea-Bărăgan vidékén)

A talajmintákat a begyűjtés sorrendjében ábrázoltuk, és a továbbiakban is mindig ezt a sorrendet használjuk az összes minta esetében (1. ábra).

A mérések során a talajminták összesszelén-tartalma 172 $\mu\text{g}/\text{kg}$ és 52,0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ között változott. A szeléntartalom átlagosan 119 $\mu\text{g}/\text{kg}$ körül alakult.

A Dobrogea-Bărăgan vidékén vett talajminták esetében a legalacsonyabb szeléntartalmat a földes kopár típusú talajmintánknál (52,0 $\mu\text{g}/\text{kg}$), míg a legmagasabb értéket a mollikus (típusos csernozjomszerű) mintánál mértünk (170 és 172 $\mu\text{g}/\text{kg}$ közötti érték). Alacsony értéket még a hidromorf-pangóvízes talaj (65,9-67,1 $\mu\text{g}/\text{kg}$) és a podzolosodott barna erdőtalaj (78,1-80,0 $\mu\text{g}/\text{kg}$) esetében észleltünk. Magasabb értéket az agyagbemosódásos barna erdőtalaj (142-148 $\mu\text{g}/\text{kg}$), a kambikus (savanyú, barna) talaj (149 -150 $\mu\text{g}/\text{kg}$) és a hidromorf réti talaj (151-158 $\mu\text{g}/\text{kg}$) esetében mértünk. A többi talajtípus esetében közepes értéket kaptunk a talaj összesszelén-tartalmára, mely 81,2-135 $\mu\text{g}/\text{kg}$ között változott. Az összes talaj szeléntartalmát vizsgálva a szórás értéke 35,5 $\mu\text{g}/\text{kg}$, a medián 111 $\mu\text{g}/\text{kg}$ volt.

A talajtípusok szeléntartalmának változása az irodalomban található adatoknak (Mayland és mtsai., 1989) megfelelően alakult, ugyanis szelén a vulkáni kőzetes talajokban (földes kopár-, hidromorf-pangóvízes-, podzolosodott barna erdőtalaj) kisebb mennyiségben fordult elő, mint az üledékes, különösen mint az agyagos talajokban (agyagbemosódásos-, barna erdő-, a kambikus-, hidromorf réti-, mollikus-típusos csernozjomszerű talajok).

Az irodalomban a talajokat szeléntartalmuk alapján négy csoportba osztották: hiányos (75 $\mu\text{g}/\text{kg}$ -nál kisebb szeléntartalom), elfogadható (75–175 $\mu\text{g}/\text{kg}$), magas (175–1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$) és kifejezetten mérgező (1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ -nál nagyobb) tartomány (Oldfield, 1999; Tan, 1989; Fordyce, 2013). Összességében elmondható, hogy

ezen a vidéken található talajok szeléntartalma az irodalomban található adatoknak megfelelően hiányos (75 µg/kg-nál kisebb szeléntartalom), és elfogadható (75–175 µg/kg) szeléntartalommal rendelkeznek. Összehasonlítva ezen a vidéken mért, és más romániai tájegységeken kapott adatokat, hasonló értékeket kaptuk a talaj szeléntartalmára vonatkozóan (Lăcătuşu és mtsai., 2010, 2012 és 2013; Lungu, 2013).

5.2. A búzamazag minták összesszelén-tartalma

A búzamazagok szeléntartalma 29,9 µg/kg és 134 µg/kg között változott (1. táblázat). A Dobrogea-Bărăgan vidékéről (2008) származó búza összesszelén-tartalma 29,9 µg/kg és 111 µg/kg között változott.

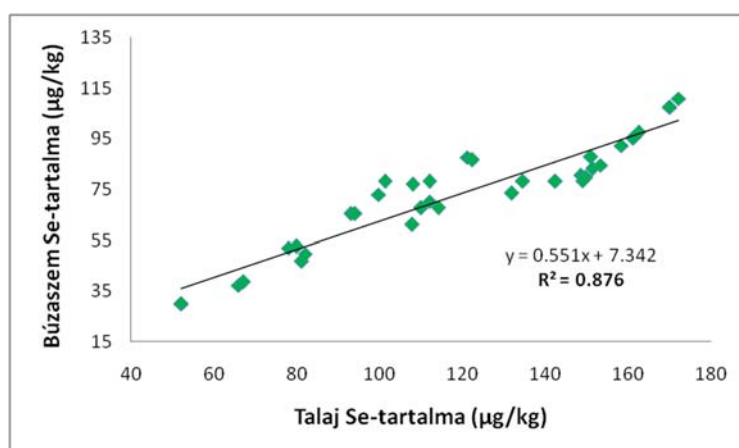
1. táblázat: A búzamazagok Se-tartalmának alakulása

Búza Se-tartalma (µg/kg)	2008-ban (Dobrogea-Bărăgan)	2009-ben (Csíki-medence)	2010-ben (Csíki-medence)
Max.	111±0,03	134±0,09	122±0,11
Min.	29,9±0,11	54,5±0,09	34,1±0,09
Átlag	72,8±0,08	101±0,08	82,9±0,06
Szórás	20,9±0,02	20,4±0,03	22,9±0,08
Medián	88,9±0,06	101±0,01	96,7±0,07

A szeléntartalom átlagosan 72,8 µg/kg körül alakult. A legalacsonyabb szeléntartalmat a földes kopár típusú talajról származó búzamazag minta esetében (29,9 és 30,4 µg/kg közötti érték), míg a legmagasabb értéket a mollikus (tipikus csernozjomszerű) talajról származó minta esetében (108 és 111 µg/kg közötti érték) mértük.

Alacsony értéket még a hidromorf-pangóvízes (37,4-38,7 µg/kg), a kambikus (savanyú) barna erdőtalaj (46,7-49,7 µg/kg) és a podzolosodott barna erdőtalajról származó búzamazagok (52,6-52,6 µg/kg) esetében észleltünk. Magasabb értéket a mollikus (litikus csernozjomszerű) (95,3-97,6 µg/kg), a mollikus (redzinák) (74,5-79,6 µg/kg) és a mollikus (tipikus csernozjomszerű) talajokról származó búzamazag (94,7-96,1 µg/kg) minták esetében kaptunk. A többi talajtípusról begyűjtött búzamazag minta közepes szeléntartalmat mutatott. A szórás értéke 20,9 µg/kg volt.

Elemeztük a Dobrogea-Bărăgan-vidéki talaj és ugyanarról a talajról begyűjtött búzamazag Se-tartalma közötti összefüggést, amelynek eredményeként (2. ábra) a korrelációs koefficiens négyzetének (R^2) az értéke 0,876, ami szoros összefüggésre utal.



2. ábra

Lineáris regresszió a búzamazag összes Se-tartalma és a talaj összes Se-tartalma között

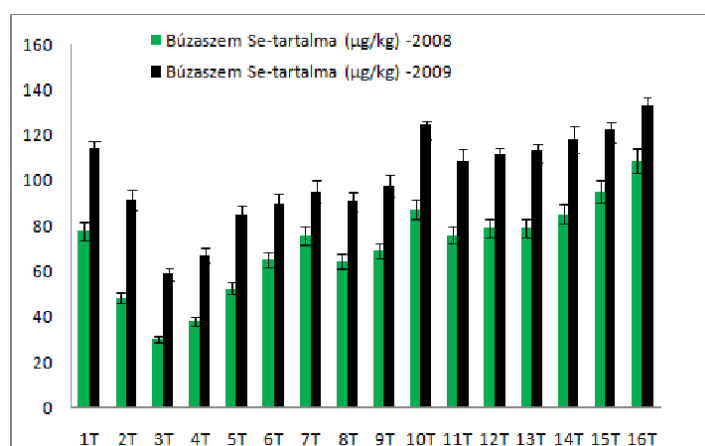
Elmondható, hogy ezen a vidéken található talajokon termesztett búzamazag szeléntartalma az irodalomban található értékekhez hasonlítva alacsony, (120 µg/kg-nál kisebb), és elfogadható (120–155 µg/kg) Se-

tartalmú tartományba sorolhatóak (Oldfield, 1999; Tan, 1989; Gawalko és mtsai., 2001; MacPherson és mtsai., 1997; Broadley és mtsai., 2010).

A Csíki-medencében 2009 és 2010-ben begyűjtött búzamazag minták összszelén-tartalma 54,5 µg/kg és 134 µg/kg között változott. A szeléntartalom átlagosan 101 µg/kg körül alakult.

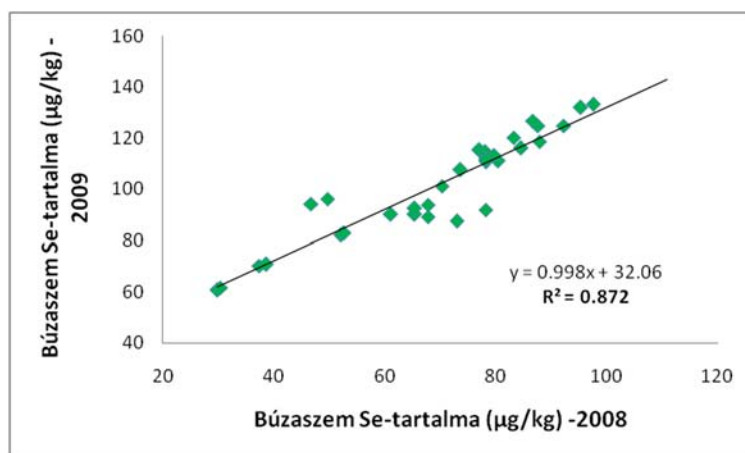
A legalacsonyabb szeléntartalmat a földes kopár típusú talajról származó búzaminta esetében (54,5 és 61,8 µg/kg közötti érték), míg a legmagasabb értéket a mollikus (tipikus csernozjomszerű) talajról származó minta esetében (132 és 134 µg/kg közötti érték) mértünk. Alacsony értéket még a hidromorf-pangóvízes (59,5-70,8 µg/kg), és a podzolosodott barna erdőtalajról (82,1-89,4 µg/kg) származó búzamazag minták esetében észleltünk. Magasabb érték a mollikus (redzinák) (113-115 µg/kg), a mollikus (litikus csernozjomszerű) (119-125 µg/kg) és a homokos (pszamoszol) talajokról származó (121-127 µg/kg) minta esetében volt. A többi talajtípusról begyűjtött minta esetében közepes szeléntartalmat kaptunk. A szórás értéke 20,4 µg/kg volt.

Az alacsonyabb szeléntartalommal rendelkező búzamazag a földes kopár típusú talajról, míg a magasabb szeléntartalommal rendelkező búzamazag minták a mollikus talajtípusról származtak, hasonlóan a 2008-as évben a Dobrogea-Bărăgan vidékéről begyűjtött búzamintákhoz (3. ábra).



3. ábra

Azonos talajtípusokról 2008-ban (Dobrogea-Bărăgan vidék) és 2009-ben (Csíki-medence) begyűjtött búzaszem Se-tartalmának összehasonlítása



4. ábra

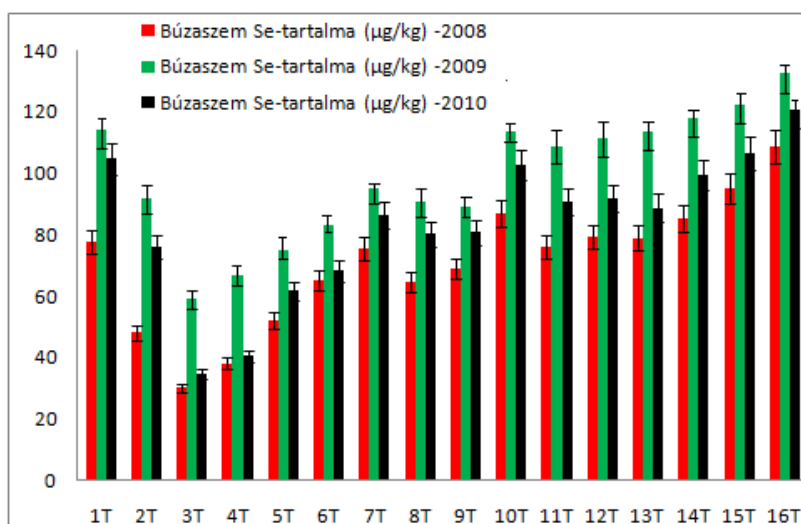
Lineáris regresszió a 2008-ban (Dobrogea-Bărăgan) és 2009-ben (Csíki-medence) begyűjtött búzamazag összes Se-tartalma között

Megvizsgáltuk a két helyszínen (Dobrogea-Bărăgan vidékén-2008 és Csíki-medence-2009) gyűjtött búzamazag minták közötti összefüggést, amely a 4. ábrán látható. A 83 darab vizsgálat eredményeként a korrelációs koefficiens négyzetének (R^2) az értéke 0,872, ami szoros összefüggésre utal. Ebből a szoros kapcsolatból azt a

következtetést vontuk le, hogy a Csíki-medence talajainak szeléntartalma arányos lehet a Dobrogea-Bărăgan talajainak Se-tartalmával.

Összehasonlítva a három évben a búzaminták összszelén-tartalmát (5. ábra) arra a következtetésre jutottunk, hogy 2008-ban a Dobrogea-Bărăgan vidékén volt a legalacsonyabb, azt követi a 2010-es év (Csíki-medence), majd a legmagasabb 2009-ben a Csíki-medencében volt. Az éghajlati körülmények 2008 és 2010-ben hasonlóak voltak, míg 2009-ben, a sok évi átlaghoz képest kimagasló volt a hőmérséklet és a csapadék-mennyiség is.

A 2008 és 2010-es években a különbség a földrajzi elhelyezkedésnek köszönhető, ugyanis a Dobrogea-Bărăgan síkvidéken a hőmérséklet a Csíki-medence hegyvidéki hőmérsékletétől egész évben átlagosan 10-12 °C-kal tér el. Ezekkel a körülményekkel magyarázható a szeléntartalom alakulása.



5. ábra

Azonos talajtípusokról 2008-ban (Dobrogea-Bărăgan vidék), 2009-ben és 2010-ben (Csíki-medence) begyűjtött búzaszem Se-tartalmának összehasonlítása

Az 5. ábrán megfigyelhető, hogy mind a három évben a szeléntartalom ugyanarról a talajtípusról származó búzamag minta esetében volt a legnagyobb és a legkisebb, ezért elemeztük a búzamagok szeléntartalma közötti összefüggést mindhárom év folyamán.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A búzamag minták Se-tartalmának vizsgálatával kapcsolatban elmondható, hogy mind a három évben a legalacsonyabb értéket a földes kopár típusú talajról (30,1 µg/kg-2008, 59,0 µg/kg-2009, 34,7 µg/kg-2010) származó búzamag minta esetében, míg a legmagasabb értéket a mollikus (tipikus vagy litikus csernozjomszerű) talajról (109 µg/kg-2008, 133 µg/kg-2009, 121 µg/kg-2010) származó búzamag minta esetében mértünk. Az időjárási körülmények mellett a talaj szerkezete és típusa fontos szerepet játszhat a szelén búzamagban való elraktározódásában.

A fentiek ismeretében feltételezem, hogy a talaj és a búzamag minták között a Csíki-medencében is ugyanúgy szoros kapcsolat létezik, vagyis az alacsony szeléntartalmú búzaminták szelénben szegény talajról, míg a magasabb szeléntartalmú minták a több szelént tartalmazó talajról származnak.

IRODALMI JEGYZÉK

- [1] Anton, A.A. – Ross, K.A. – Lukow, O.M. – Fulcher, R.G. – Arntfield, S.D.: Influence of added bean flour (*Phaseolus vulgaris* L.) on some physical and nutritional properties of wheat flour tortillas. *Food Chemistry*, 2008. 109. 33-41.
- [2] Broadley, M. R. – Alcock, J. – Alford, J. – Cartwright, P. – Fairweather-Tait, S. J. – Foot, I. – Hart, D. J. – Hurst, R. – Knott, P. – McGrath, S. P. – Meacham, M. C. – Norman, K. – Mowat, H. – Norman, K. – Stroud, J. L. – Tovey, M. – Tucker, M. – White, P. J. – Young, S. D. – Zhao, F. J.: 2010. Selenium biofortification of high-yielding winter wheat (*Triticum aestivum* L.) by liquid or granular Se fertilisation. *Plant Soil*. 32. (1–2): 5–18.

- [3] Broadley, M. R. – Whit, P. J. – Bryson, R. J. – Meacham, M. C. – Bowen, H. C. – Johnson, S. E. – Hawkesford, M. J. – McGrath, S. P. – Zhao, F. J. – Breward, N. – Harriman, M. – Tucker, M.: 2006. Biofortification of UK food crops with selenium. *Proceedings of the Nutrition Society*. 65: 169–181.
- [4] Clark, L. C. – Cantor, K. P. – Allaway, W. H.: 1991. Selenium in forage crops and cancer mortality in United States counties. *Archives of Environmental Health*. 46: 37–42.
- [5] Combs, G. F.: 2001. Selenium in global food systems. *British Journal of Nutrition*. 85: 517–547.
- [6] Combs, G. F.: 2005. Current evidence and research needs to support a health claim for selenium and cancer prevention. *Journal of Nutrition*. 135: 343–347.
- [7] Craig, P. J.: 1986. Organometallic compounds in the environment. Longman Group Ltd., London. 255–277.
- [8] FAO, WHO: 2001. Human Vitamin and Mineral Requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. World Health Organization. Food and Nutrition Division FAO Rome. 15: 235–250.
- [9] Fordyce, F. M.: 2013. Selenium deficiency and toxicity in the environment., *Essentials of Medical Geology*. 375–416.
- [10] Gawalko, E. J. – Garrett, R. G. – Nowicki, T. W.: 2001. Trace elements in western Canadian hard red spring wheat (*Triticum aestivum* L.): levels and quality assurance. *J Assoc Anal Intl*. 84: 1953–1963.
- [11] Gissel-Nielsen, G. – Gupta, U. C. – Lamand, M. – Westermarck, T.: 1984. Selenium in soils and plants and its importance in livestock and human nutrition. *Advances in Agronomy*. 37: 397–460.
- [12] Gondi, F.: 1991. Environmental geochemistry: the example of selenium. In: Pais, I. Ed.: *Cycling of nutritive elements in geo- and biosphere*. KÉE. Budapest. 5–18.
- [13] Kádár I. (1998): Szélén forgalma a talaj-növény rendszerben. In: A szélén szerepe a környezetben és egészségvédelemben. (Szerk.: Cser, M. – Sziklainé, L. I.). Budapest. 6-19.
- [14] Kádár I.: 1995. A talaj-növény-állat-ember tápláléklánc szennyeződése kémiai elemekkel Magyarországon. *Regiocon Nyomda*. Kompolt. Budapest. 388.
- [15] Kádár I.: 2012. A főbb szennyező mikroelemek környezeti hatása. *Talajtani és Agrokémiail Intézet*, Budapest. 359.
- [16] Lăcătușu R. – Lungu, M. – Aldea, M. M. – Lăcătușu, R. – Stroe, V. M – Rizea, N. – Lazăr, R.: 2010. Selenium in rock-soil system in the South-Eastern part of Romania. *Journal of Agricultural Sciences*. 42. (4): 199-204.
- [17] Lăcătușu, R. – Stanciu-Burileanu, M. M. – Lungu, M. – Rîșnoveanu, I. – Rizea, N. – Lazăr, R. – Calciu, I. –, Eftene. A. – Stroe, M. V.: 2013. Selenium in some sandy soils of Southern Oltenia Romania. *Soil Science*. 47. (2): 5-22.
- [18] Lăcătușu, R. – Stanciu-Burileanu, M. M. – Rîșnoveanu, I. – Lungu, M. – Rizea, N. – Lăcătușu, A. R. – Lazăr, R.: 2012. Selenium in Salsodisols located in the Călmățui and Buzău rivers Valleys. *Factori și procese pedogenetice în zona temperată*. 11. (1): 33-42.
- [19] Lungu, M. – Lăcătușu, A. R. – Stanciu-Burileanu, M. M. – Lazăr, R. – Rizea, N. – Stroe, M. V.: 2013. Selenium mobilization in some soils of Romania. *Soil Forming Factors and Processes from the Temperate Zone*. 12, 2. 9–15.
- [20] MacPherson, A. – Barclay, M. N. I. – Scott, R. – Yates, R. W. S.: 1997. Loss of Canadian wheat imports lowers selenium intake and status of the Scottish population. In: Fischer, P. W. F. – Abbe, M. R. L. – Cockell, K. A. – Gibson, R. S. (eds.). *Trace elements in man and animals-9*. National Research Council Press, Ottawa. 203–205.
- [21] Mayland, H. F. – James, L. F. – Panter, K. E. – Sonderegger, J. L.: 1989. Selenium in seleniferous environments. In: Jacobs, L. W. (ed.). *Selenium in Agriculture and the Environment*. SSSA Special Publication. *Soil Science of America and American Society of Agronomy*. Madison, WI. 15–50.
- [22] Mikkelsen, R. L. – Page, A. L. – Bingham, F. T.: 1989. Factors affecting selenium accumulation by agricultural crops. In: Jacobs, L. W. (ed.), *Selenium in Agriculture and the Environment*, SSSA Special Publication No. 23 *Soil Science of America and American Society of Agronomy*, Madison, WI, 65–94.
- [23] Oldfield, J. E.: 1999. *Selenium World Atlas*. Selenium–Tellurium Development Association, Grimbergen. Belgium. 83.
- [24] Patócs, I.: 1990. Occurrence of heavy metals, toxic elements in the soils of Hungary. In: Pais, I. (ed.). *Hardly known trace elements*. KÉE. Budapest. 19–30.
- [25] Pырzыnska, K.: 2002. Determination of selenium species in environmental samples. *Microchim. Acta*. 140: 55–62.
- [26] Rasmussen, L. B. – Hollenbach, B. – Laurberg, P. – Carlé, A. – Hög, A. – Jørgensen, T. – Vejbjerg, P. – Ovesen, L. – Schomburg, L.: 2009. Serum selenium and selenoprotein P status in adult Danes-8-year followup. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 23: 265–271.
- [27] Tan, J. N. – Huang, Y. J.: 1991. Selenium in geo-ecosystem and its relation to endemic diseases in China. *Water Air and Soil Pollution*. 57–68.
- [28] Tan, J. N.: 1989. The atlas of endemic diseases and their environments in the People's Republic of China. Science Press, Beijing. 194.
- [29] Whanger, P. D.: 2004. Selenium and its relationship to cancer: an update. *British Journal of Nutrition*. 91: 11–28.
- [30] Zayed, A. – Lytle, C. M. – Terry, N.: 1998. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants. *Planta*. 206: 284–292.

Raktár-irányítási rendszerek hatékonyságnövelési lehetőségeinek vizsgálata

Examination of Efficiency Improvement Possibilities for Warehouse Management Systems

Analiza posibilităților de îmbunătățire a eficienței sistemelor de gestionare a depozitelor

Dr. TAMÁS Péter¹, Prof. Dr. ILLÉS Béla²

¹Miskolci Egyetem, Logisztikai Intézet, E-mail: alttpeti@uni-miskolc.hu

²Miskolci Egyetem, Logisztikai Intézet, Email: altilles@uni-miskolc.hu

ABSTRACT

In the practical situations the ERP systems' warehouse management systems (WMS) don't satisfy the customer needs in every cases. In many cases numerous the improvement possibilities are untapped (e. g. optimized material handling, system evaluation functions, etc.). The paper explores the possible improvement directions of warehouse management systems, as well as possible ways of their realization as well. The one mode of the development is making of the supplementary applications which detail of realization method will be also presented in this paper. The elaborated procedure's application will be illustrated through a real company problem as well.

ÖSSZEFOGLALÓ

A gyakorlati életben a vállalatirányítási (ERP) rendszerekhez beszerezhető raktár-irányítási rendszerek (WMS) működése nem minden esetben elégíti ki a vállalati igényeket. Sok esetben számos fejlesztési lehetőség marad kiaknázatlan (pl. optimalizált anyagmozgatás, rendszerértékelő funkciók, ..., stb.). A dolgozat feltárja a WMS-ek továbbfejlesztésének lehetséges irányait, valamint a megvalósítás lehetséges formáit is. A fejlesztés egyik gyakran alkalmazott módja a kiegészítő alkalmazások készítése, mely megvalósítási módszerének ismertetése szintén a dolgozat tárgyát képezi. A kidolgozott eljárás alkalmazását egy konkrét vállalati probléma megoldásán keresztül is bemutatjuk.

Kulcsszavak: fejlesztési lehetőségek, WMS, ERP,

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a megfelelően kialakított raktár-irányítási rendszerek – a veszteségek kiküszöbölésén keresztül – jelentős mértékben növelni tudják a raktározási folyamatok működésének hatékonyságát. A raktározási folyamatokban hosszútávon a 3MU, vagyis a Muri (Túlterhelés), Mura (Egyenetlenség) és a Muda (veszteség) kiküszöbölése a cél [1]. A Muri és a Mura minden esetben Muda-t okoz, ezért beszélhetünk sok esetben célként a veszteségek kiküszöböléséről. Raktározási tevékenységnél a túlterhelés a dolgozók és az anyagmozgató gépek tekintetében értelmezhető. A dolgozóknál növelheti az egészségügyi károsodás kockázatát, a kifizetett túlórapénzt, valamint a hibásan végrehajtott feladatok számát, míg az anyagmozgató berendezéseknél ez idő előtti meghibásodáshoz, többletkarbantartáshoz vezethet. Az egyenetlenség a műszakonkénti anyagmozgató teljesítmények jelentős ingadozását jelenti, amely sok esetben az erőforrások túlterhelésével és kihasználatlanságával is jár, mely ugyancsak kedvezőtlen a vállalatok számára. A vállalatirányítási rendszerek (ERP) sok esetben külön raktár-irányítási rendszermodullal (WMS) is rendelkeznek, ezek általában olyan keretrendszerek, amelyek ugyan a legtöbb vállalat által használhatóak, de nem veszik figyelembe az egyes vállalatípusoknál jelentkező speciális feladatokat, hatékonyságnövelési lehetőségeket [2]. Az ERP-khez rendelkezésre álló raktár-irányítási rendszerek működésének módosítására több lehetőség létezik, melyek:

- a WMS újabb verziójának beszerzése (tartalmazza a szükséges funkciót),

- az aktuális WMS módosítása (jelenlegi rendszer programjának módosítása),
- egy kiegészítő alkalmazás beszerzése (más gyártó által forgalmazott rendszer beszerzése),
- egy kiegészítő alkalmazás készítése (saját kiegészítő raktár-irányítási alkalmazás készítése).

Gyakorlati tapasztalatok alapján a fenti változatok közül alapvetően az ár, illetve a megvalósítás átfutási ideje és minősége alapján döntenek a vállalatok. A vállalatok sokszor a speciális igények kielégítése, valamint a forgalmazott szoftverek és azok fejlesztőinek rugalmatlansága miatt saját kiegészítő alkalmazás készítése mellett döntenek. A továbbiakban a raktározási folyamatok kezelésére szolgáló kiegészítő alkalmazások fejlesztési lehetőségeit, valamint megvalósításuk módszerét, végül egy ezzel kapcsolatos vállalati projekt megvalósulásának folyamatát mutatjuk be.

2. RAKTÁR-IRÁNYÍTÁSI RENDSZEREK FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEI

A vállalatirányítási rendszerekhez tartozó raktár-irányítási rendszerek eltérő fejlettségi szintűek, ezért az adaptáló vállalatoknak különböző alkalmazások kifejlesztésére lehet szükségük. A fejezet gyakorlati tapasztalatok alapján összefoglalja a fejlesztések fontosabb irányvonalait, lehetőségeit.

1. Hatékonyabb információáramlás [3]: Sok esetben, vállalatok még olyan ERP-hez kapcsolódó vállalatirányítási rendszereket alkalmaznak, ahol az anyagmozgatási utasítások kiadása és nyugtázása papír alapon történik. Ez a nagy anyagforgalommal rendelkező raktáraknál jelentős veszteségeket okoz (magas papírköltség, be-, kitárolási, leltározási ciklusidő, valamint jelentős a tévesztések, hibák előfordulásának esélye, stb.). Tehát egy kiegészítő szoftvermodul elkészítésével ugyanezen feladatok hatékonyabban – elektronikus úton való kiadása, nyugtázása is – megvalósíthatóvá válik (pl. feladatkiadás, nyugtázás mobil adatgyűjtő szkennerrel, hangvezérelt rendszer, interaktív szemüveg vagy egyéb más megoldás segítségével).

2. Részletesebb termék-nyomkövetés [4]: Az ERP-khez tartozó raktár-irányítási rendszerek a raktárhoz kapcsolódó készletmozgásokat sok esetben csupán néhány relációban teszik lehetővé, vagyis nem kapunk teljes képet a rendelkezésre álló anyagok, alkatrészek állapotáról. Ilyen eset lehet pl. az, hogy a termelésből visszamaradt anyag egy több lépcsős visszatárolási folyamatban éppen hol található vagy amennyiben egy tárhelyen több beszállításból származó terméket helyezünk el, akkor annak megállapítása, hogy melyik mikor érkezett és milyen gyártási időpontok kapcsolódnak hozzá.

3. Új elemzési lehetőségek [5]: A vállalatok sok esetben eltérő üzleti filozófiával rendelkeznek, különböző célokat, célkitűzéseket határoznak meg. A célok teljesítésének előrehaladása raktározási folyamatoknál indikátorok képzésével, meghatározásával történik, melyek meghatározása számos esetben nem része az alkalmazott raktár-irányítási rendszernek. Ezen funkciók alkalmazása érdekében lehet szükség egy kiegészítő alkalmazás elkészítésére.

4. Hatékonyabb anyagmozgatás [6, 7]: A raktári anyagmozgatás általában előre definiált elvek alapján történik, melyek módosításához az alkalmazott raktár-irányítási rendszer kereteiben nincs lehetőség. A raktári anyagmozgatás tekintetében a szakirodalom különféle hatékonyságnövelő megoldást tárgyal (pl. legközelebbi tárhelyre való betárolás, fix tárhelyre való betárolás, optimalizált áttárolás [8], forgási sebesség figyelembevételével történő betárolás, stb.), melyek megvalósításához kiegészítő szoftvermodul elkészítésére lehet szükség.

Előfordulhat, hogy a fentiekben ismertetett fejlesztési lehetőségek megvalósítására külön-külön vagy akár együtt is szüksége lehet egy vállalatnak.

3. KIEGÉSZÍTŐ ALKALMAZÁS MEGVALÓSÍTÁSÁNAK FOLYAMATA

Abban az esetben, ha egy vállalat kiegészítő alkalmazás megvalósításával szeretné hatékonyabbá tenni raktározási rendszerének működését, akkor egy, az 1. ábra szerinti több lépcsőből álló folyamatot kell megvalósítania. Az alábbiakban a folyamat lépéseinek fontosabb jellemzőit részletezzük.

Folyamat lépései:

1. Jelenlegi folyamat feltérképezése: A jelenlegi anyag- és információáramlási rendszer működésének feltérképezésére alkalmazhatók egyedi megoldások, illetve a lean filozófia eszköztárához tartozó értékfolyamat térképezés módszere is [9]. Alapvető célkitűzés a jelenlegi folyamat megismerése.

2. Fejlesztési irányok meghatározása: A jelenlegi állapot részletes megismerését követően lehetővé válik a raktár-irányítási rendszer új fejlesztési irányainak meghatározása (pl. részletesebb terméknyomkövetés hiányos információk miatt, feladatok kiosztásának megváltoztatása papír alapú változatról elektronikusra, stb.).

3. Fejlesztési követelmények meghatározása: A vállalat szakembereinek egyértelműen meg kell határozniuk a kiegészítő alkalmazással szemben támasztott követelményeket, melyek a következők lehetnek:

- nyújtandó többletszolgáltatások,

- rendelkezésre álló maximális költségkeret,
- hatékonyságnövelés mértéke egyes logisztikai mutatóknál (pl. berakodási ciklusidő, kommissiózási ciklusidő, ..., stb.).

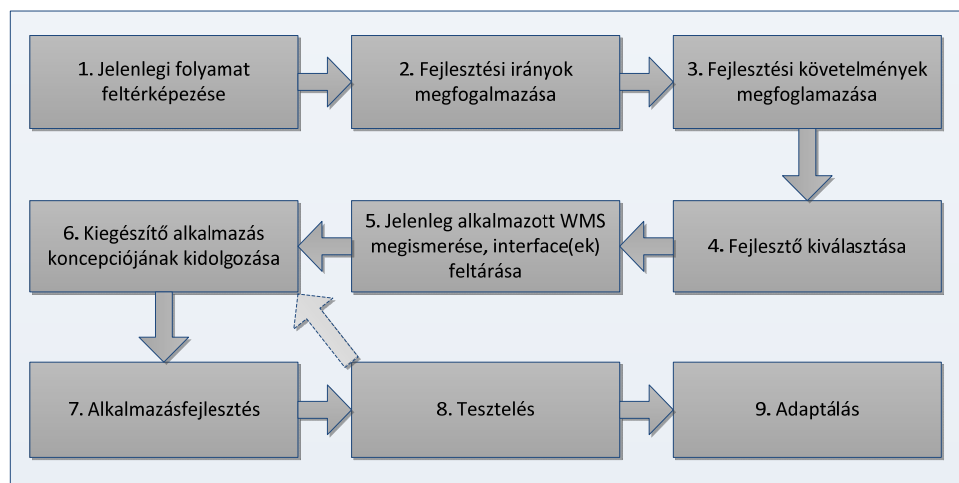
4. Fejlesztő kiválasztása: Az 1-3 lépés megvalósítása során nyert információk alapján a vállalaton belüli vagy külső informatikai szakember(ek) kiválasztása történik ebben a lépésben.

5. Jelenleg alkalmazott WMS megismerése, interface(ek) feltárása: Egy kiegészítő alkalmazás elkészítésénél az egyik legfontosabb feladat a jelenlegi WMS és a kidolgozásra váró alkalmazás közötti adatcsere lehetséges módjainak feltárása. A feladat elvégzése a WMS-t forgalmazó és a kiegészítő alkalmazás elkészítésére felkért szakember(ek) feladata.

6. Kiegészítő alkalmazás koncepciójának kidolgozása: Az 1-5. lépésben szerzett információk alapján elkészíthető a kiegészítő alkalmazás koncepciója, melyben:

- a vállalat és/vagy felkért logisztikai szakemberek,
- a WMS-t működtető és a felkért informatikus szakemberek,
- a módosítandó munkafolyamatokban résztvevő személyek,
- a vállalatvezetés kell, hogy szerepet vállaljon.

Nagyon fontos, hogy a koncepció kialakítása a megvalósításban érintett személyek bevonásával, konszenzussal történjen.



1. ábra

Kiegészítő raktár-irányítási alkalmazás bevezetésének folyamata

7. Alkalmazásfejlesztés: A felkért informatikus szakemberek a meghatározott koncepció alapján elkészítik a kiegészítő alkalmazást (szükség esetén a későbbiekben alkalmazandó eszközök (vonalkód leolvasó, smart szemüveg, ..., stb.) bérlésére és/vagy megvásárlására is szükség van).

8. Tesztelés: A kiegészítő alkalmazás elkészültét követően a módosított raktár-irányítási rendszer működésének tesztelése szükséges. A tesztelés hatásaként sok esetben a kiegészítő alkalmazás koncepciójának és így az alkalmas módosítására is szükség lehet, mivel előfordulhatnak olyan szempontok, melyeket a tervezéskor nem vettek figyelembe (6-8. lépés megismétlése).

9. Adaptálás: A véglegesített raktár-irányítási rendszer bevezetése.

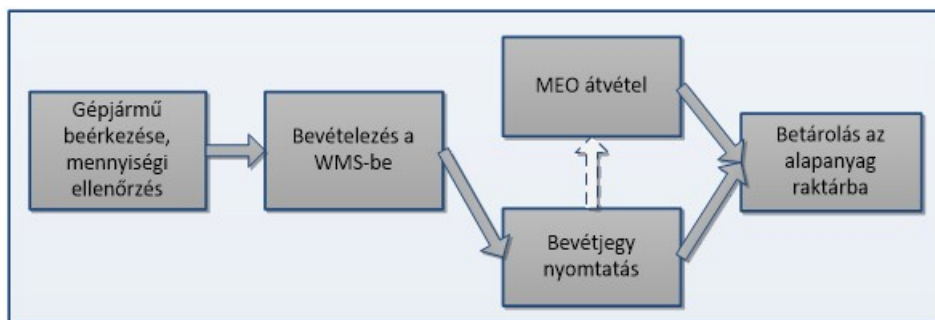
4. KIEGÉSZÍTŐ ALKALMAZÁS MEGVALÓSÍTÁSA ALAPANYAG RAKTÁROZÁSI RENDSZERNÉL

A fejezetben a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézete, valamint egy pneumatikai termékeket gyártó vállalat közötti együttműködés eredményeként megvalósult kutatás fontosabb mozzanatait mutatjuk be. A megvalósítás folyamatának lépései teljes mértékben megegyeztek a 3. fejezetben ismertetett lépésekkel, ugyanakkor titoktartási okok miatt a kiegészítő alkalmazás valós képernyőterveit nem mutathatjuk meg.

1. Jelenlegi folyamat feltérképezése: A vizsgált alapanyag raktározási rendszere vonatkozásában a betárolás, kitérítés, áttárolás és leltározás folyamatait tártuk fel, melyek a következők voltak.

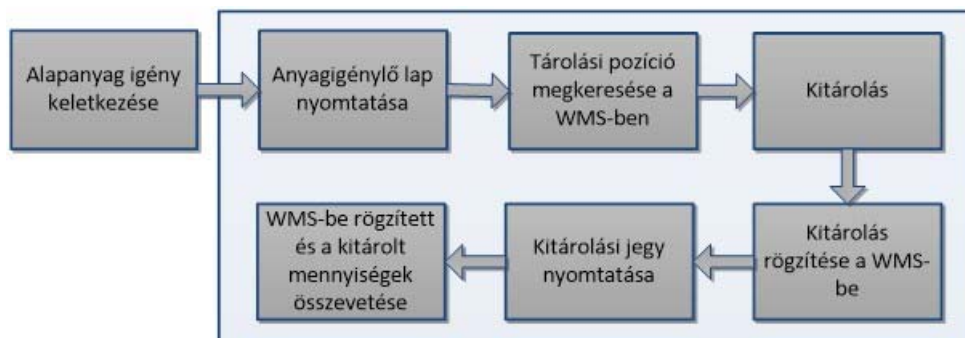
Betárolási folyamat (2. ábra): A gépjármű beérkezését követően a szállítólevél adatai alapján a termékeket tételesen ellenőrizték. Adategyezőség esetén a szállítólevél adatait a WMS-ben rögzítették, melyet köve-

tően a betárolandó egységcsomagok számával megegyező „bevétjegy” nyomtattak. A „bevétjegy” tartalmazta fontosabb logisztikai információként a betárolandó termék nevét, cikkszámát, cikkszámát vonalkód formájában, azon tárolási pozíciókat, ahol már a betárolandó terméktípusból korábban elhelyeztek valamilyen mennyiséget, valamint a betárolandó termék mennyiségét is. A minőségi ellenőrzést követően (megbízható beszállítók esetén nem volt minőség ellenőrzés) – a „bevétjegy” lévő adatok alapján – a termék vagy a „bevétjegy” felajánlott (azon tárhelyek, ahol korábban már tárolásra kerültek azonos típusú terméket) tárhelyek valamelyikére, vagy annak közelébe tároltak be. Abban az esetben, ha új tárhelyre került, akkor az új tárolási pozíciót rögzíteni kellett a WMS-be.



2. ábra
Betárolási folyamat

Kitárolási folyamat (3. ábra): A termelés részéről megfogalmazott alapanyag igény egy igénylő lapon keletkezett, melyet a termelésben dolgozó személyek állítottak elő.



3. ábra
Kitárolási folyamat

Az igénylő lap tartalmazta a termék nevét, cikkszámát, cikk-számát vonalkód formájában, kitárolandó mennyiséget, kitárolási pozíciót, valamint a termelés egy meghatározott pozícióját, ahová a kiszállítás kellett, hogy történjen. A kapott információk alapján való kitárolást követően a WMS-be rögzíteni kellett a kitárolt termékek cikkszámát, valamint a kitárolt mennyiséget. Az adatrögzítést követően kinyomtattak egy „kivétjegy”-t, amely a WMS-be rögzített adatokat tartalmazta, abból a célból, hogy a ténylegesen kitárolt és a WMS-be rögzített mennyiségeket összehasonlítsák.

Áttárolási- és leltározási folyamat: Az áttárolásnak kétféle formája fordult elő, vagyis egyrészt a raktárak tárhelyei között, valamint a termelés és a raktárak tárhelyei között. Az utóbbi eset akkor fordult elő, ha a termelésbe kiszállított alapanyagot nem használták fel teljes mértékben és egy részét vissza kellett szállítani az alapanyag raktárba (pl. száanyagok, rúdanyagok). Ezt a folyamatot a kiinduló- és a célobjektumok (pl. termelés, alapanyagraktár) azonosítójának, valamint a mozgatott termék cikkszámának és mennyiségének beírásával rögzítették a WMS-be. A leltározási tevékenységet 1 évben egyszer végezte el a vállalat a WMS-ben nyilvántartott és a raktárban ténylegesen lévő készletek összehasonlítása érdekében. A leltározási tevékenység a leltározási jegy és a leltározási bizonylat kinyomtatásával kezdődött. A leltározási jegy tartalmazta a termék cikkszámát, megnevezését, valamint azon tárhelyeket, ahol a termékeket elhelyezték. A tárhelyek felkeresését és a termékek megszámlálását – szükség esetén mérését – követően a leltározott mennyiségeket a dokumentumokra rögzítették. A termékek leltározását követően

en a tényleges és a WMS-ben nyilvántartott készlet adatokat összehasonlítását követően az eltéréseket korrigálták a WMS-ben.

2. Fejlesztési irányok megfogalmazása: Az előző pontban ismertetett folyamatok számos fejlesztési potenciállal rendelkeztek (lásd 2. fejezet), ugyanakkor a vállalat a rendelkezésre álló pénzügyi keretek figyelembe vételével a következők megvalósítását tűzte ki célul:

- FIFO (First In First Out) elv betartása [10] (az alkalmazott WMS nem tudta külön nyilvántartani az egy tárhelybe betárolt – különböző beszállításokból származó – termékek betárolási időpontjait, mennyiségeit, emiatt a FIFO elv betartására sem volt lehetőség),
- Adatrögzítés pontosságának növelése [11] (az alkalmazott WMS nem tette lehetővé a pontos termék-nyomkövetést),
- Leltározás folyamatának hatékonyság-növelése (papír alapon valósult meg a folyamat, ezért a megszámlolt/megmért mennyiségek rögzítése, valamint a nyilvántartott adatok és a leltározott mennyiségek közötti eltérések meghatározása, kezelése sok időt vett igénybe).
- Rendszer értékelését szolgáló mutatók meghatározása [12] (a WMS nem rendelkezett olyan funkcióval, amely lehetővé tette volna a raktározási folyamatok értékelését).

3. Fejlesztési követelmények meghatározása: A célok meghatározását, valamint a rendelkezésre álló pénzügyi forrásokat figyelembe véve a következő követelményeket határoztuk meg:

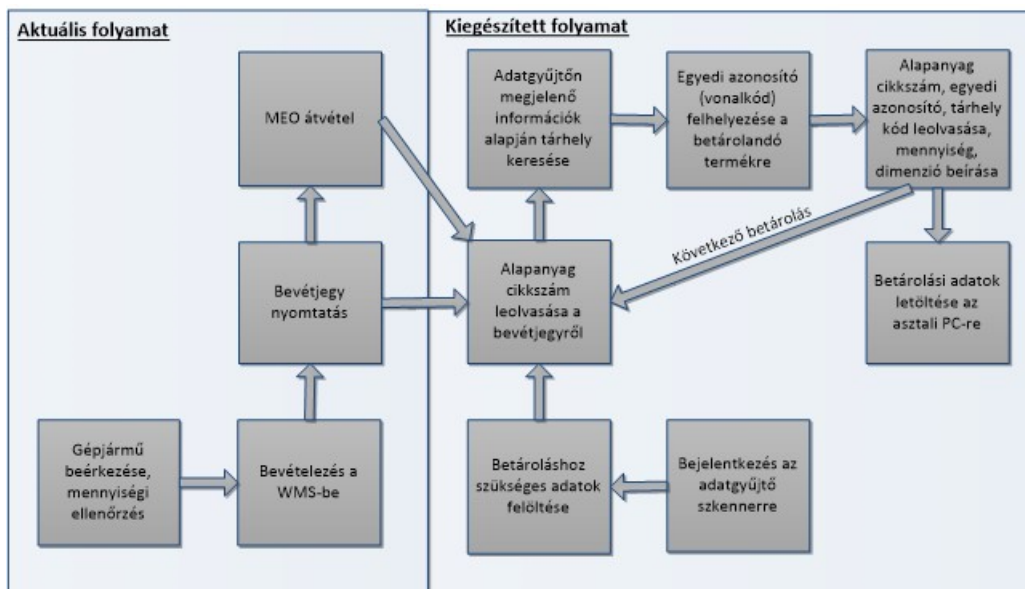
- raktározás során keletkező adatokat ott és akkor kell rögzíteni, ahol felmerültek, tehát szükséges mobil adatgyűjtő szkenner használata,
- a tárolási pozíciókat egyedi vonalkódos azonosítóval kell ellátni a pontos termék-nyomkövetés érdekében,
- minden egyes tárhelybe elhelyezett – különböző beszállításból származó – termékre egyedi azonosítót kell helyezni,
- a be-, kitárolási, áttárolási és leltározási feladatokat mobil adatgyűjtő szkenner segítségével kell elvégezni,
- a mobil adatgyűjtő szkennerre és az asztali PC-kre kiegészítő alkalmazások elkészítése szükséges.
- a raktározási folyamatok értékelése érdekében különböző értékelő mutatók előállításának lehetőségét biztosítani kell (pl. betárolási-, kitárolási-, leltározási ciklusidő, termékek forgási sebessége, készletérték, utánpótlási idők alakulása, stb.).

4. Fejlesztő(k) kiválasztása: A vizsgált vállalat és a Miskolci Egyetem intézetei között korábban már több kutatási projekt sikeresen megvalósult, elsősorban ezért is esett a választás az egyetem Logisztikai Intézetének, illetve Informatikai Intézetének kutatóira. A feladat alapvetően a céloknak és követelményeknek eleget tevő koncepció kidolgozása és megvalósítása volt.

5. Jelenleg alkalmazott WMS megismerése, interface-ek feltárása: Az alkalmazott WMS rendelkezett a kétirányú kommunikáció biztosításához szükséges felülettel. Titoktartási okok miatt ezzel kapcsolatban részletek nem közölhetők.

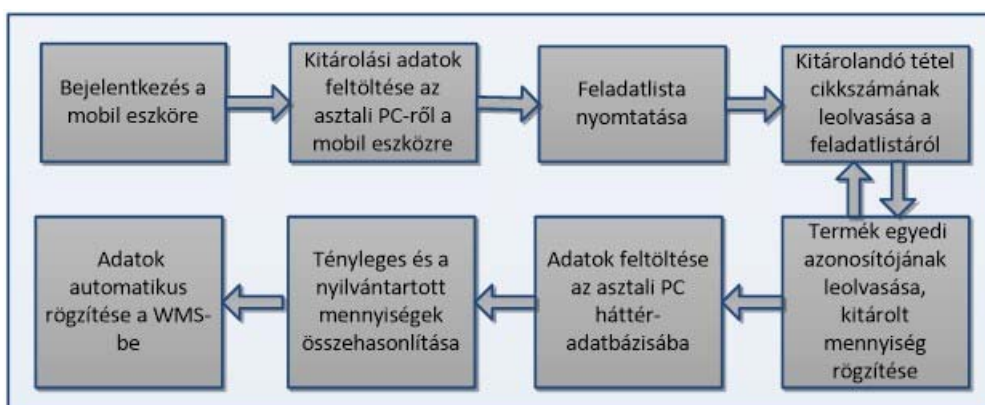
6. Kiegészítő alkalmazás koncepciójának kidolgozása: A kiegészítő alkalmazások adatbázis és képernyőterveit titoktartási okokból nem mutathatjuk be, ugyanakkor a fejezet bemutatja a módosított raktározási folyamat koncepcióját.

Módosított betárolási folyamat (4. ábra): A folyamat alapvetően a MEO átvételig nem változik. A folyamat többi lépésénél kiegészítésként megjelenik az asztali PC-kre és a mobil adatgyűjtő szkennerre írt alkalmazások használata. A használathoz a betárolást végző személynek be kell jelentkeznie a használt mobil adatgyűjtő szkennerre (költségtakarékossági okokból dokkolós megoldás beszerzése), valamint rá kell töltenie az asztali PC-k valamelyikéről a betároláshoz szükséges kiegészítő információkat (pl. az egyes terméktípusokból hol és milyen mennyiségű termék található). A „bevétegyen” lévő alapanyag cikkszám leolvasását követően az adatgyűjtő szkenner jelzi, hogy hol és milyen mennyiségben található a leolvasott terméktípus. Amennyiben a meghatározott tárhelyek valamelyikében van szabad hely, akkor oda, egyéb esetben pedig a kijelölt tárhelyek közelébe kell az alapanyagot betárolni. A betárolást végző személynek a tárhely megtalálását követően egy egyedi azonosítót kell felhelyeznie a betárolandó termékre, majd ehhez az azonosítóhoz a többi információt is társítani kell (pl. tárhelykód, mennyiség, stb.). Az adatok mobil adatgyűjtő szkennerbe való rögzítését követően a betárolást végző személynek az asztali PC háttér-adatbázisába fel kell töltenie a betárolásnál összegyűjtött adatokat.



4. ábra
Módosított betárolási folyamat

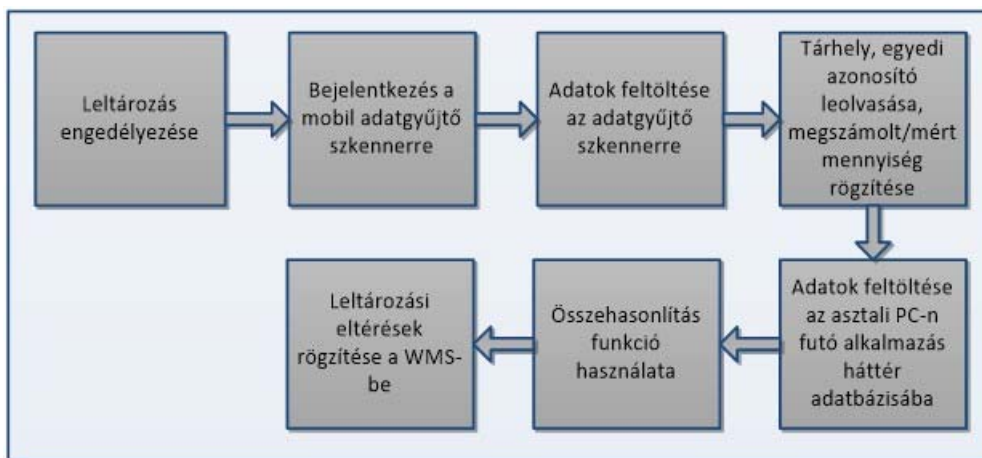
Módosított kitárolási folyamat (5. ábra): Első lépésként a kitárolást végző személynek be kell jelentkeznie a mobil adatgyűjtő szkennerre, majd fel kell töltenie a kitárolási feladatok ellátásához szükséges adatokat. Az adatok feltöltését követően egy listát is nyomtat, amely tartalmazza a kitárolandó termék nevét, a cikkszámot számsor, illetve vonalkód formájában, a kitárolandó mennyiséget, valamint a kiszállítás célállomását. A feladatlistáról a cikkszám vonalkódjának leolvasását követően az adatgyűjtő szkenneren megjelenik a termék FIFO elv szerinti kitárolási sorrendje (cikkszám, tárhely, mennyiség). A kitárolást végző személynek a kitárolási pozíció megtalálását követően le kell olvasnia a termék egyedi azonosítóját, majd az adatgyűjtő szkenneren rögzítenie kell a kitárolt termék mennyiségét is. Ezen adatokat a mobil adatgyűjtő szkenner háttér adatbázisában elment, melyeket a kitárolási feladatok elvégzését követően az asztali PC-k háttér adatbázisába is feltöltik. Az asztali PC-re való feltöltést követően a kitárolt alapanyagok kitárolt alapanyag (P) minősítést kapnak, a kiszállítást követően a státuszt át kell állítani kiszállított (D) típusúvá. A kitárolt és a rögzített adatok összehasonlítása érdekében kinyomtatnak egy dokumentumot. Az adatok eltérése esetén az adatbázisban módosítani kell a nyilvántartott adatokat. Az ellenőrzött adatok DB státuszt kapnak, majd automatikusan aktualizálják a WMS háttéradatbázisában (honnan, hová, cikkszám, mennyiség adatok).



5. ábra
Módosított kitárolási folyamat

Módosított leltározási folyamat (6. ábra): A leltározási folyamat kezdetét megelőzően a raktárvezetőnek az asztali PC-n futó szoftver kezelői felületén engedélyeznie kell a leltározási feladatokat. Ekkor a termékek be-, kitárolási és áttárolási feladatainak végrehajtását letiltják. Erre azért van szükség, mert a leltározás során egy állapotot kell vizsgálni, tehát változatlan állapotot kell biztosítani. A leltározási funkció engedélyezését

követően a mobil adatgyűjtő szkennerre fel kell tölteni a leltározási feladatok elvégzéséhez szükséges adatokat (pl. cikkszám, megnevezés) a könnyebb azonosítás érdekében. Egy kezdő tárolási pozíciótól kezdődően le kell olvasni a termék egyedi azonosítóját, majd be kell írni a leltározott mennyiséget.



6. ábra
Módosított leltározási folyamat

A leltározott adatokat a szkenner háttér adatbázisában elmentik, melyet a leltározás elvégzésével vagy bizonyos időközönként az asztali PC-n lévő alkalmazás háttér adatbázisába kell másolni. Az asztali PC-n futó program összehasonlítási funkciót is tartalmaz, vagyis össze tudja hasonlítani a leltározott és a WMS-ben nyilvántartott adatokat. Az eltéréseket engedély esetén automatikusan átvezik a WMS, illetve a kiegészítő alkalmazás háttér adatbázisába.

7-9. *Alkalmazásfejlesztés, tesztelés, adaptálás:* A meghatározott koncepciónak megfelelően, az asztali PC-re, illetve a mobil adatgyűjtő szkennerre az alkalmazások fejlesztése megtörtént. A tesztelés során a kisebb problémákat feltártuk és megoldottuk (pl. adatgyűjtő szkenneren betűk olvashatóságának javítása, új adatmezők adaptálása, új logisztikai mutatók meghatározási lehetőségének biztosítása, ..., stb.). A megfelelően működő rendszert először párhuzamosan, majd önállóan is alkalmazták.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat feltárta a raktár-irányítási rendszerek (WMS) működésének lehetséges hiányosságait, fejlesztési lehetőségeit, valamint a fejlesztések megvalósításának alternatíváit is. A kiegészítő alkalmazások kiegészítése gyakran alkalmazott megoldás a korábban beszerzett WMS-ek hiányosságainak kiküszöbölésére, melynek megvalósítási módszerét szintén bemutattuk. A bemutatott módszer alkalmazásának szemléltetését egy konkrét vállalati probléma megoldásán keresztül is ismertettük. Összességében elmondható, hogy a WMS-ek továbbfejlesztésére rendkívül sok kutatási lehetőség létezik, melyek kidolgozásával a vállalatok versenyképessége jelentős mértékben növelhető.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 691942". „A kutatómunka a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Mechatronikai és Logisztikai Kiválósági Központ keretében valósult meg.”

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] M. Rother M., J. Shook: Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda, Lean Enterprise Institute ISBN 0966784308
- [2] J. Cselényi, B. Illés: Planning and controlling of material flow systems. Textbook, Miskolci Egyetemi Kiadó (2006)
- [3] Cs. Tápler, T. Hartványi, K. Krivács: Basic requirements of material traceability in warehouses In: Romualdas Ginevičius, Aleksandras Vytautas Rutkauskas, Remigijus Počas (szerk.) The 6th International Scientific Conference Business and Management 2010: Selected Papers. Konferencia helye, ideje: Vilnius, Litvánia, pp. 849-855. (2010)
- [4] E. Frazelle: World-Class Warehousing and Material Handling, ISBN 0-07- 137600-3.
- [5] B. Illés, E. Glistau, N. I. C. Machado: Qualitätssicherung der Logistik und Logistik in der Qualitätssicherung, COMEC 2004, ISBN 959-250- 147-5, Cuba (2004)
- [6] M. ten Hompel; T. Schmidt: Warehouse Management – Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg (2010)
- [7] P. Dobos, B. Illés, P. Tamás: Conception for selection of adequate warehouse material handling strategy, Advanced Logistic Systems:Theory and Practice 9: (1) pp. 53-60 (2015)
- [8] L. Chen, A. Langevin, D. Riopel:A tabu search algorithm for the relocation problem in a warehouse system, Int. J. Production Economics pp 147-156 (2011)
- [9] B. Keyte, D. A. Locher: The complete lean enterprise: Value stream mapping for administrative and office processes, ISBN: 978-1-4200-8153-4, CRC Press, Taylor and Francis Group (2004)
- [10] G. Gianpaolo , L. Gilbert, M. Roberto: Introduction to Logistics Systems Planning and Control, ISBN: 0-470-84917-7, pp. 119-155.
- [11] E. M. David: Warehouse distribution and operations handbook, ISBN 0-07- 044002-6
- [12] T. Jedlicska, R. Skapinyecz: Introduction of ModernWarehouse-Automation Technologies, XXVII. microCAD International Scientific Conference, 2013, University of Miskolc, Hungary

Gömbhéjak poligonális horpadási alakjának vizsgálata

Examination of Polygonal Buckling Shapes of Spherical Shells

Studiul pierderii stabilității locale sub forma poligonală ale învelitorilor sferice

VETŐ Dániel¹, SAJTOS István²

¹egyetemi tanársegéd, ²egyetemi docens
BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék,
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., www.szt.bme.hu

ABSTRACT

The paper discusses the buckling of spherical shells. Our goal is to determine the buckling shape of spherical shells subjected to concentrated load. The load-deflection diagram, concerning this case, is also to be determined. It is shown that the buckling shapes with axisymmetry and discrete symmetry of revolution have no direct connection between each other through inextensional deformations. The results of the proposed model, which is able to treat buckling shapes with discrete symmetry of revolution (i.e. polygonal shapes), show good agreement with experiments.

ÖSSZEFOGLALÓ

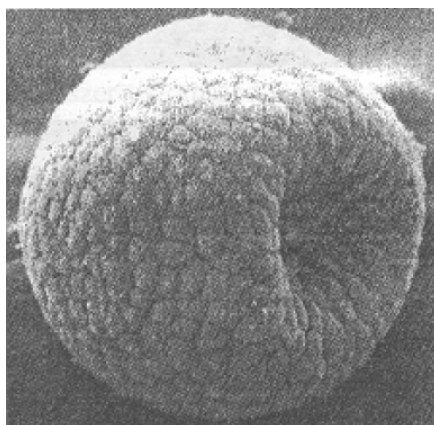
A cikk gömbhéjak horpadásával foglalkozik, célja a koncentrált erővel terhelt gömbhéjak horpadási alakjának meghatározása, illetve a horpadáshoz tartozó teher-elmozdulás összefüggés megállapítása. Bebizonyítottuk, hogy a körszimmetrikus horpadási alak és a diszkrét forgásszimmetrikus (poligonális) horpadási alak nem vihető egymásba a felület nyúlásmentes alakváltozásai segítségével. A cikkben bemutatott, a poligonális horpadási alakok figyelembevételére is alkalmas analitikus modell segítségével kapott eredmények jó egyezést mutatnak a kísérletekben tapasztaltakkal.

Kulcsszavak: héj, gömbhéj, horpadás, poligon, nyúlásmentes alakváltozás

1. BEVEZETÉS

A rugalmas anyagú vékony héjak nagy elmozdulásainak vizsgálata fontos szerepet játszik a mechanikában és más tudományterületeken is. A héjak a felületszerkezetek egy speciális csoportját képviselik. Felületszerkezeteknek nevezzük az egyéb méreteikhez viszonyítva viszonylag kis (általában elhanyagolható) vastagsággal bíró szerkezeteket. Ezen belül héjaknak nevezzük azokat, amelyeknek középfelülete (egy vagy két irányban) görbült [6] [13]. A cikk gömbhéjakkal foglalkozik. Gömb alakú vagy gömbszerű héjak számos kutatási területen előfordulnak. Az építőmérnöki és gépészmérnöki kutatásokban a kupolák, héjszerkezetek, repülőgépek és űrjárművek szerkezeti részei, továbbá tartályok, nyomástartó edények, mikrokapcsolók hangsúlyosan szerepelnek. A nanotechnológiai kutatások során a nanoméretű szerkezetek, a fizikai kémiában a kolloidrészesecskék [26] alakváltozásainak vizsgálata szorosan kötődik a héjelmélethez. A biológiai és orvostudományi alkalmazások száma meglehetősen nagy, például az egyedfejlődés (1. ábra) [9] [19], a biomimetikus polimerhártyák, a vírusok és élő sejtek, a szív és a keringési rendszer vizsgálata során, vagy akár gyógyszerek zárt molekulába való „csomagolása” esetén.

A gömbhéjak horpadásának vizsgálata meghatározó kutatási téma volt a 20. század derekán [13] [16]. Napjainkban újra középpontba került ez a terület a vékony szerkezetek szerepének növekedése és a numerikus számítási technikák fejlődése következtében. A héjak teher-elmozdulás összefüggésének meghatározása nem egyszerű feladat, még jelenleg is jelentős eltérés tapasztalható az elméleti és a kísérleti eredmények között. Ez az eltérés nem csak a geometriai imperfekciók, anyagi nemlinearitás és egyéb, figyelembe nem vett hatások következménye. Az eltérés nagyrészt az elméleti modellek tökéletlenségéből származik.



1. ábra

Tengerisün embrió a sejtosztódás során [9]

A kutatók a közelmúltig általában körszimmetrikus horpadási alakot feltételeztek [7] [16] [25] [30] [35], annak ellenére, hogy a horpadási alak a valóságban sokszor nem körszimmetrikus, hanem sokszög alaprajzú, ahogy számos publikációban [1] [10] [11] [12] [15] [21] [31] [32] látható. A mindennapi életben is számos esetben ez utóbbit látjuk igazolódni, például vékony műanyag csomagolóanyagok vagy akár pingponglabdák horpadása esetén. A publikációk tanúsága szerint a kutatók egyöntetű véleménye az, hogy a gömbhéjak horpadásának vizsgálata még nincs lezárva, a terület további kutatást igényel [1] [32].

Menyhárd héjszerkezetekkel foglalkozó könyvében az a megállapítás szerepel, hogy a héjszerkezetek főként felületükön megoszló terheket hordanak [18]. Bizonyos esetekben, főként kis méretű héjak esetén azonban nagy szerep jut a koncentrált tehernek is, illetve az ennek hatására létrejövő horpadásnak. Kutatásunk célja, hogy a koncentrált erővel terhelt gömbhéjak horpadási alakját meghatározzuk. További cél a koncentrált teherhez tartozó teher-elmozdulás diagram meghatározása. Ezeknek az eredményeknek az eléréséhez analitikus modellt fejlesztünk ki, mely megmutatja a lehetséges horpadási alakokat, és megadja a teher-elmozdulás diagramot. A modell szerint (és a valóságban is) a gömbhéjak először körszimmetrikus horpadási alakot mutatnak a terhelés során, majd a teher növekedésével ez alakul át valamilyen nem-körszimmetrikus (poligonális) horpadási alakká. Kutatásunk során a nem-körszimmetrikus horpadási alakok közül csak a szabályos sokszög alaprajzúakat vizsgáltuk, melyeket diszkrét forgásszimmetrikusnak nevezünk.

Számos kutatási eredményt találhatunk koncentrált erővel terhelt gömbhéjakra vonatkozóan az irodalomban, melyek diszkrét forgásszimmetrikus, általában szabályos sokszög alaprajzú horpadási alak feltételezésével születtek. Bár lényegében ugyanazt a jelenséget tárgyalják, az eredmények néha egészen eltérőek. A diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alakkal foglalkozik Pogorelov [24], és kritikus terhet állapít meg a horpadási alak körszimmetrikusból diszkrét forgásszimmetrikussá változásához. Bushnell [4] és Penning [22] azt állítják, hogy a horpadási sokszög oldalainak száma három, négy vagy öt lehet. Ezen sokszögek megjelenésének sorrendje a terhelés növekedésével szerintük alapvetően ez, de – ahogy állítják – a kísérletek ennek némileg ellentmondanak. Fitch [8] szerint a horpadási sokszög jellemzően nem változik a terhelés során, a létrejövő sokszög a héj relatív vastagságától (sugár-vastagság arányától) függ: vastagabb héjak ötszög alakot (vagy esetleg körszimmetrikus alakot) mutatnak, vékonyabb héjak esetén három- vagy négyszöget láthatunk. Tarnai [29] nagyon vékony héjat (melyben egy belső merev gömb is található) vizsgál belső vákuum-terhelésre. Ez nem az az eset, amelyet a kutatók nagy része vizsgál, de érdemes megemlíteni az összetett, a héj egész felületére kiterjedő, öt- és hatszögekből álló, méhsejtekhez hasonló mintázata miatt. Pauchard és Rica [21] a koncentrált teherrel terhelt gömbhéjakat vizsgálja, és a megállapításuk az, hogy a horpadási alak a következőképpen változik a terhelés növekedésével: kör, ellipszis, háromszög, négyszög, ötszög. Galpin, Grolleau és szerzőtársaik [10] [11] azt állítják, hogy a horpadási sokszögek megjelenésének oka a gyártás során kialakuló anyagi anizotrópia. Vaziri és szerzőtársa [31] [32] azt állítja, hogy a sokszögek megjelenésének sorrendje nagyjából ugyanaz, mint Pauchard és Rica cikkében (kivéve az ellipszist) [21]. Zárt képletet is adnak az egyes sokszögek megjelenéséhez tartozó elmozdulásra vonatkozóan, mely tartalmazza a héj relatív vastagságát (sugár-vastagság arányát). A merev lappal történő nyomás esetét is tárgyalják, állításuk az, hogy vastagabb héjagnál csak ötszöget, vékonyabb héjagnál csak négyszöget láthatunk. Quilliet és szerzőtársai [26] nagyon kis méretű gömbhéjakat (kolloidrészcskéket) vizsgálnak, melyeket belső vákuum-terhelésnek vetnek alá. A felületen létrejövő mintázat a relatív vastagságtól függ. Knoche és Kierfeld [15] három különböző horpadás-fajtát különböztet meg egy gömbhéj terhelése során: az úgynevezett elsődleges horpadást (ehhez tartozik az alsó kritikus teher), az úgynevezett klasszikus horpadást (ehhez tartozik a felső kritikus

teher) és az úgynevezett másodlagos horpadást. Az első két horpadás (elsődleges és klasszikus) teherszintjei között a héj lehet horpadt (ekkor a horpadás még csak körszimmetrikus lehet) és horpadásmentes állapotban is. Az utolsó horpadáshoz (másodlagos) tartozó teherszint felett a héj már biztosan horpadt állapotban van, és ez biztosan nem-körszimmetrikus horpadási alakot jelent. Mindezeket összevetve kijelenthető, hogy a gömbhéjak horpadásának vizsgálata még mindig aktuális, hiszen sok alapvető kérdésre nincs válasz, illetve jelentősen eltérő megállapítások lehettek fel az irodalomban.

2. NYÚLÁSMENTES (IZOMETRIKUS) ALAKVÁLTOZÁSOK

Kutatásunk során Pogorelov, a 20. század híres ukrán matematikusa által használt geometriai módszert vettük alapul. A kutató az 50-es évek derekán dolgozta ki módszerét, melynek során a horpadási alakot az eredeti héjfelület izometrikus transzformáltjaként határozza meg, és ennek segítségével állapítja meg a horpadási terhet. Az izometrikus transzformáció fogalmának meghatározásához fontosnak tartjuk a felületekkel kapcsolatos néhány alapvető jelenség leírását.

A felületek alakváltozása általános esetben nyújtásból és hajlításból tevődik össze. A nyújtás a felületen mérhető ívhosszak (pozitív vagy negatív előjelű) megváltozását jelenti. Azokat az alakváltozásokat, amelyek a felületen mérhető ívhosszakat nem változtatják meg, izometrikus transzformációnak vagy nyúlásmentes alakváltozásnak nevezzük. A hajlítás a felület görbületeinek (pozitív vagy negatív előjelű) megváltozását jelenti. A hajlítás bekövetkezhet nyúlásmentes alakváltozások esetén is: ez annak a következménye, hogy a felületen mérhető ívhosszak a felület ún. belső geometriai jellemzőivel kifejezhetők [13].

Általános esetben az alakváltozások mindkét fajtája (azaz nyújtás és hajlítás) egyidejűleg létrejön egy felület deformálásakor, de valójában a héjak esetén sokszor csak hajlítást láthatunk a felület jelentős részén. Ennek magyarázata a vékony szerkezetek mechanikájában keresendő: a nyújtással szembeni merevség (K_s) és a hajlítással szembeni merevség (K_b) eltérően függ a héj vastagságától:

$$K_s = \frac{Et}{1-\nu^2}, \quad (1)$$

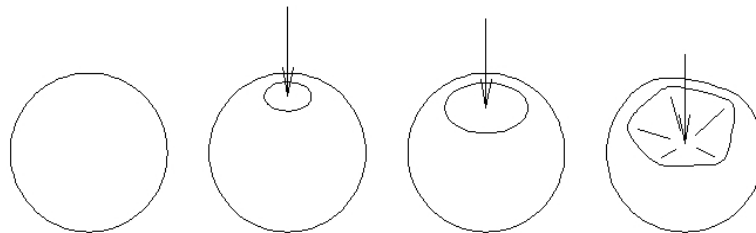
$$K_b = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (2)$$

A fenti képletekben E a Young-modulus, t a héj vastagsága, ν a Poisson-tényező. Látható, hogy $t \rightarrow 0$ esetén $K_b / K_s \rightarrow 0$, tehát a héj vastagságának csökkenése esetén a nyújtással szembeni merevség előtérbe helyeződik a hajlítással szembeni merevséghez képest. Ez azt okozza, hogy egy vékony héjban nyúlások nem következnek be, mert ez túl sok energiát emésztene fel [27], így tehát az alakváltozások nyúlásmentesek maradnak.

A nyúlásmentes alakváltozásokkal kapcsolatosan az irodalomban sok érdekes és lényeges megállapítás olvasható. A héjak horpadása szempontjából talán a legfontosabb az úgynevezett geometriai merevséggel kapcsolatos, mely szerint az infinitezimálisan vékony felületek két csoportra oszthatók: geometriailag merev és nem merev felületekre. Egy felület geometriailag merev, ha nem létezik olyan (folytonos) alakváltozás-rendszer, amely a felületen létre tud jönni a kiindulási geometriából. Például ilyen a zárt teljes gömbfelület. Ennek alakja csak úgy tud megváltozni, ha a felületet egy síkkal metsszük, és a lemetezett részt „tükrözzük” erre a síkra. Ekkor létrejön egy olyan alak, amely bár nyúlásmentes, de nem érhető el közvetlenül a kiindulási alakból, hanem csak a felület egy részének nyúlással járó alakváltozásán keresztül. Nyilvánvaló, hogy azok a felületek, amelyek nem tartoznak a geometriailag merev felületek csoportjába, geometriailag nem merevek. Például ilyen egy sík lap. Ennek számos, a nyúlásmentes alakváltozások körébe tartozó állapota hozható létre folytonosan.

A valóságban a héjak véges vastagsággal rendelkeznek (tehát nem infinitezimálisan vékonyak), ezért az alakváltozások nem mindig tudnak nyúlásmentesek maradni: tipikusan lokálisan nyúlásmentes vagy kvázi-nyúlásmentes alakváltozásokat láthatunk. A valóságban csak a geometriailag merev felületek esetén tudnak ténylegesen nyúlásmentes (izometrikus) alakváltozások létrejönni. A geometriailag merev valódi felületek, például a zárt teljes gömbfelület, sokszor csak lokálisan nyúlásmentes (lokálisan izometrikus) alakváltozásokat mutatnak. Ez azt jelenti, hogy a felület csaknem teljes egésze nyúlásmentes állapotban marad, kivéve a felület viszonylag kis részét, ahol viszonylag nagy nyúlások jönnek létre [14] [25]. Gömbfelület esetén ez annak az állapotnak felel meg, amikor a felület egy része kilapul, de még nem „pattan át” a gömb középpontja felé (egy pingponglabda segítségével könnyen vizsgálható ez az állapot, mely viszonylag kis benyomódáshoz tartozik). Egyéb esetekben sokszor a geometriailag merev valódi felületeken egyidejűleg következik be nyúlás és hajlítás, azonban a felület különböző részein különböző a nagyságrendje ezeknek az alakváltozásoknak. A felület nagy részén jellemzően hajlítási alakváltozásokat láthatunk, nyúlások nélkül, de van néhány él vagy csúcs, amelyekben a nyúlások

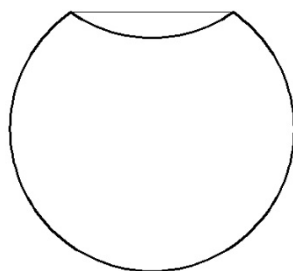
dominálnak (2. ábra). Ezt az állapotot kvázi-nyúlásmentesnek (kvázi-izometrikusnak) nevezzük (a kvázi-nyúlásmentes alakváltozások henger- és hiperboloid-héjaknál is előfordulnak [5]). Az ehhez az állapothoz tartozó alak gömbhéj esetén lehet körszimmetrikus vagy diszkrét forgásszimmetrikus is.



2. ábra

Geometriailag merev valódi felület (zárt teljes gömbfelület) lehetséges alakváltozásai

A fentiek szerint tehát egy héjnak többféle kvázi-nyúlásmentes alakváltozási állapota is létrejöhet. A kísérletek során [34] azt tapasztalhatjuk, hogy a körszimmetrikus horpadási alakból alakul ki a benyomódások növekedése során a diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alak. Felmerül a kérdés, hogy ezek között az állapotok között van-e közvetlen átjárás a kvázi-nyúlásmentes alakváltozások körén belül. Ha infinitezimálisan vékony héjakat tekintünk, akkor a kérdés megfogalmazható úgy, hogy képes-e egy teljes gömbfelületből egy sík mentén történő elmozdulással képzett, a körszimmetrikus horpadási alaknak megfelelően egymásba illesztett két gömbsüveg-felület nyúlásmentes alakváltozásokra olyan módon, hogy az egymáshoz csatlakozó peremük mentén nem alakul ki elmozdulás-különbség közöttük (3. ábra). A kérdés Niordson héjelméleti könyve alapján [20] viszonylag egyszerűen megválaszolható.



3. ábra

Egymásba illesztett két gömbsüveg-héj metszete

Egy gömbsüveg-héj peremének a felület nyúlásmentes alakváltozásaihoz tartozó elmozdulásai a következőképpen fejezhetők ki:

$$w^* = \left(A_m (m + \cos \theta) \tan^m \frac{1}{2} \theta \right) \cos m \phi, \quad (3)$$

$$u = \left(- A_m \tan^m \frac{1}{2} \theta \right) \sin \theta \cos m \phi, \quad (4)$$

$$v = \left(- A_m \tan^m \frac{1}{2} \theta \right) \sin \theta \sin m \phi, \quad (5)$$

ahol w^* , u és v jelentik (a könyv szerinti jelöléseket alkalmazva) a normál- és az érintőirányú elmozdulásokat, A_m tetszőleges konstans (felfogható úgy is, mint az elmozdulások amplitúdója), θ jelenti a gömbsüveg meridiánirányhoz tartozó szögét, ϕ a gyűrűirányhoz tartozó szöveget, m pedig az alakváltozás gyűrűirányban kialakuló hullámszámához tartozó, 1-nél nagyobb egész szám. Ha azt szeretnénk, hogy a két egymáshoz csatlakoztatott gömb-

süveg-héj peremének elmozdulásai között ne legyen különbség, akkor a következő egyenlőségeknek kell fennállniuk:

$$A_{m,1}(m + \cos \theta_1) \tan^m \frac{1}{2} \theta_1 = A_{m,2}(m + \cos \theta_2) \tan^m \frac{1}{2} \theta_2, \quad (6)$$

$$-A_{m,1} \tan^m \frac{1}{2} \theta_1 \sin \theta_1 = -A_{m,2} \tan^m \frac{1}{2} \theta_2 \sin \theta_2, \quad (7)$$

ahol $A_{m,1}$ és $A_{m,2}$, illetve θ_1 és θ_2 a két gömbsüveg-héjhoz tartozó értékeket jelentik. A (7) egyenlőség felírásakor kihasználtuk azt, hogy az u és v elmozdulások (4) és (5) kifejezése csak egy ϕ -től függő tényezőben tér el egymástól, így az ezekben az irányokban értelmezett elmozdulások különbségének zérus voltát a (7) egyenlőség fennállása egymagában biztosítja. A (6) és (7) egyenlőség felírható a következő, $A_{m,1}$ -re és $A_{m,2}$ -re rendezett egyenletrendszer formájában is:

$$\begin{bmatrix} (m + \cos \theta_1) \tan^m \frac{1}{2} \theta_1 & -(m + \cos \theta_2) \tan^m \frac{1}{2} \theta_2 \\ -\tan^m \frac{1}{2} \theta_1 \sin \theta_1 & \tan^m \frac{1}{2} \theta_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{m,1} \\ A_{m,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

mely annak kihasználásával, hogy a gömbsüvegek ugyanazon gömbből való elmetszéssel képződtek (azaz $\theta_1 + \theta_2 = \pi$) a következőképpen is felírható:

$$\begin{bmatrix} (m + \cos \theta_1) \tan^m \frac{1}{2} \theta_1 & -(m + \cos \theta_1) \cot^m \frac{1}{2} \theta_1 \\ -\tan^m \frac{1}{2} \theta_1 \sin \theta_1 & \cot^m \frac{1}{2} \theta_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{m,1} \\ A_{m,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Ez az egyenletrendszer akkor ad a triviálisól eltérő megoldást, ha az együtthatómátrix determinánsa zérus. E determináns könnyen meghatározható, melyet 0-val egyenlővé téve a következő, m -től független kifejezés adódik:

$$\theta_1 = \frac{k\pi}{2}, \quad (10)$$

ahol k pozitív egész szám. Ez az eredmény azt jelenti, hogy a körszimmetrikus horpadási alaknak megfelelően egymásba illesztett, ugyanazon gömbből való elmetszéssel képzett két gömbsüveg-héj (a fizikailag lehetséges eseteket számításba véve) kizárólag abban az esetben képes a peremek közötti elmozdulásmentességet megőrző nyúlásmentes alakváltozásra, ha a hozzájuk tartozó meridián-irányhoz tartozó szög $\pi/2$ (azaz két félgömbből van szó). Tehát általában nem alakulhat ki az a nyúlásmentes alakváltozás, amelynek során a peremek egymáshoz viszonyítva elmozdulásmentesek maradnak. Ez olyan eredmény, amelyet a mérnöki intuíció alátámaszt, de a mérnöki héjelméleti kutatások során tudomásunk szerint még nem vizsgálták.

A fentieknek megfelelően megállapítható, hogy a körszimmetrikus és a diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alak általában nem vihető egymásba nyúlásmentes alakváltozásokon keresztül. Tehát a kísérletekben látható diszkrét forgásszimmetrikus (poligonális) horpadási alakok vizsgálati modellekben történő figyelembevételére szükség van, mert csak valamilyen teher-szint-változás tudja előidézni azt a nyúlással járó alakváltozást, ami ezeknek az alakoknak a létrejöttéhez szükséges. Másképp megfogalmazva: a diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alakhoz tartozó teher-elmozdulás összefüggés szükségszerűen eltér a körszimmetrikus horpadási alakhoz tartozó összefüggéstől.

3. ALKALMAZOTT FELTÉTELEZÉSEK, MÓDSZEREK

A héjak horpadása esetén nagy elmozdulásokról és nagy alakváltozásokról beszélhetünk, legalábbis a felület bizonyos részein. Ha olyan módon gondolkodunk, hogy nem közvetlenül az elmozdulásokat és a belőlük (deriválással) származtatott alakváltozásokat használjuk fel egyenleteinkben, akkor az elmozdulások és az alakváltozások nagysága nem okoz különösebb számítási nehézségeket. Ezt teszi lehetővé az energiamódszer. Az energiamódszer alapja a szerkezet teljes potenciális energiájára vonatkozó stacionaritási (állandóértékűségi) tétel:

$$\frac{\partial W}{\partial u_i} = 0, \quad (11)$$

ahol W a teljes potenciális energia funkcionálját, u_i pedig a lehetséges elmozdulás-változókat jelöli. A szerkezet akkor van egyensúlyban, ha a teljes potenciális energia funkcionálja szélsőértéket vesz fel, tehát a lehetséges elmozdulás-változók szerinti első variációi zérus értékűek. Az egyensúlyi helyzet akkor stabil, ha a második variációk zérusnál nagyobbak, tehát a szélsőérték lokális minimumot jelent:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial u_i^2} > 0. \quad (12)$$

Megjegyzendő, hogy a (12) kifejezésben szereplő egyenlőtlenség teljesülése csak szükséges, de nem elégséges feltétele a minimum létezésének: a második variációkból képzett úgynevezett Hesse-mátrix determinánsa is nagyobb kell, hogy legyen zérusnál. A gömbhéjak poligonális horpadási alakjának vizsgálata során numerikus módszert használunk a szélsőérték-keresésre, így a Hesse-mátrix vizsgálata elmarad.

A teljes potenciális energia a szerkezet – adott alakhoz tartozó – alakváltozási energiájából és az elmozdulás során a terhek által végzett munkából számítható ki. Pogorelov jelöléseit használva [25] a kifejezés a következő:

$$W = U - A, \quad (13)$$

ahol U az alakváltozási energia, A a terhek által végzett munka. Ezek meghatározásához nyilvánvalóan szükség van bizonyos elmozdulások és alakváltozások ismeretére, de ezeket elegendő csak az adott egyensúlyi állapotra vonatkozóan ismerni, nem kell az ehhez vezető „utat” leírni. Az energiamódszer további előnye még, hogy ha az alakváltozott alak több elmozdulás-paraméterrel jellemezhető, akkor is egyszerűen kezelhető marad.

A vizsgálatok során teljes gömbbel foglalkozunk, az imperfekciókat (kezdeti pontatlanságokat) figyelmen kívül hagyjuk, vékony héjat vizsgálunk (a gömb vastagságának és sugarának hányadosa kicsi), lineárisan rugalmas, homogén, izotrop anyagot feltételezünk. A héj terhelése koncentrált teher, mely tükörszimmetriával rendelkezik (azaz a teljes gömb mindkét felén működik, egymással ellentétes irányban), a horpadás során létrejövő elmozdulásrendszert elforgatási szimmetriával rendelkezőnek feltételezzük. Ez az elforgatási szimmetria lehet folytonos, vagy diszkrét forgásszimmetria (és ezzel egyidejűleg tükörszimmetria). Előbbi eset jelenti a kör alakú horpadási élt, utóbbi pedig a poligonálisat, amely jelen cikkben síkbeli szabályos sokszög.

4. MODELL LEÍRÁSA

A gömbhéj horpadási alakját sok kutató körszimmetrikusnak feltételezte a vizsgálatai során [7] [16] [25] [30] [35]. Ez a körszimmetrikus horpadási alak az eredeti héjfelület kvázi-izometrikus transzformáltjának tekinthető, mert a kör alakú horpadási élen kívül eső részen nincs alakváltozás, az élen belüli részen pedig csak hajlítási alakváltozás alakul ki (az eredeti görbületek ellentettjei alakulnak ki ezen a felületrészen). Nyúlások csak a horpadási él környezetében jelentkeznek, de ez a héj felületének csak nagyon kis részére korlátozódik. A körszimmetrikus horpadási alakhoz tartozó vizsgálatok eredményeit [33] [34] tartalmazza.

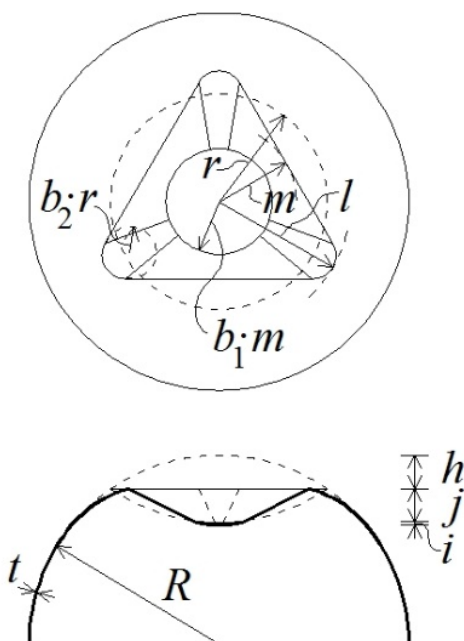
Kísérletekben tapasztalható tény, hogy a gömbhéjak horpadt alakját általában nem kör alakú él jellemzi, hanem valamilyen sokszöghöz hasonló. A kísérletek azt mutatják, hogy kis benyomódások esetén kör alakú horpadási él alakul ki, majd a benyomódások növekedése során ebből keletkezik a sokszöghöz hasonló alak. A 2. fejezetben leírtak alapján belátható, hogy ezeknek a horpadási alakoknak a figyelembevétele indokolt. Kutatásunk során a Pogorelov-féle, kizárólag körszimmetrikus horpadási alakok vizsgálatára alkalmas modellt továbbfejlesztettük, kiterjesztettük az alkalmazhatóságát diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alakokra is. A modellt Pogorelov [23] [25], Audoly, Ben Amar és Pomeau [1] [2], továbbá Lobkovsky [17], Pauchard és Rica [21], illetve Calladine és szerzőtársai [35] alapján dolgoztuk ki [34]. A sokszöghöz hasonló alakú horpadási éllel kapcsolatosan az irodalomban az a két leggyakoribb feltételezés, hogy síkbeli és szabályos. A cikkben mi is ezeket a feltételezéseket használjuk. Az első feltételezés, mely arra vonatkozik, hogy a horpadási él síkbeli, horpadt héjakat vizsgálva szemmel láthatóan nagyon közel áll a valósághoz. A második feltételezés, mely arra vonatkozik, hogy a horpadási él szabályos sokszög, az esetek nagy részében szintén magától értetődőnek tűnik, azonban az esetek kis részében a héj nem szabályos sokszögnek megfelelő horpadási alakot vesz fel. Ezen eseteket a cikkben nem vizsgálom, a téma további kutatást igényel.

A sokszög csúcsai kis mértékben mindig lekerekítettek. Ezeket a lekerekítéseket sokszor figyelmen kívül hagyjuk, képzeletünkben könnyen meghosszabbítjuk az éleket, hogy metszéspontot kapjunk. Ez az irodalomban fellelhető modellekben is így szerepel, tehát a kutatók figyelmen kívül hagyják azt, hogy a valóságban nem jelen-

nek meg a sokszög csúcsai. Véleményünk szerint azonban ezt valamilyen módon figyelembe kell venni. A következőkben bemutatott modellben a sokszögek nem csúcsosan jelennek meg, hanem valamilyen lekerekített alakzatot láthatunk.

A horpadási élen belüli részen elhelyezkedik egy úgynevezett belső kör, mely által körülhatárolt felületrész az eredeti gömbfelület inverziójával, tükrözésével nyerhető (így az eredeti gömbfelület egy részének izometrikus transzformáltja). Ennek a belső körnek az átmérője kisebb vagy egyenlő, mint a horpadási él sokszögébe írható kör átmérője. A belső kör és a horpadási sokszög közötti felületrészekon kvázi-izometrikus alakváltozás tapasztalható, mely lehetővé teszi, hogy a két él közötti részen közelítőleg nyúlásmentes maradjon a felület. A horpadási sokszögon kívül is található egy kvázi-izometrikus alakváltozásokkal jellemezhető rész, mely lehetővé teszi, hogy a sokszög alakú él és a horpadás során alakváltozásokat nem szenvedő felületrészek közötti részen is közelítőleg nyúlásmentes maradjon a felület.

Az alak paraméterei: h a héj tetőpontja és a horpadási alakzat síkja közötti távolság, n a (szabályos) sokszög oldalainak száma, b_1 a horpadási élen belüli rész lekerekítettségét kifejező szám, b_2 a horpadási él lekerekítettségét kifejező szám. A modell szerinti horpadt héj felülnézetét és metszetét a 4. ábrán láthatjuk. Az ábrán látszik, hogy a teljes benyomódás – a horpadt részek alakjából következően – nem feltétlenül egyenlő $2h$ -val, hanem $h + j + i$ adja meg. Megjegyzendő, hogy speciális esetként ebben a modellben is előállhat a körszimmetrikus alak, ekkor a teljes benyomódás nagysága éppen $2h$ -val egyenlő ($j + i = h$), illetve $b_1 = b_2 = 1$. A teljes benyomódás meghatározásához szükséges j és i értéket az alak paramétereiből származtatjuk: j a horpadási alakzat síkja és az ezen belül elhelyezkedő belső kör síkja közötti távolság, i pedig az említett belső körön belüli (inverz) gömbsüvegrész magassága. Ha $b_1 = 0$, akkor a horpadási alakzat a horpadási élen belüli részen teljesen csúcsos (egy csúcsban futnak össze a horpadt részek), ha $b_1 = 1$, akkor teljesen lekerekített (az eredeti gömbi geometriával rendelkezik). Ha $b_2 = 0$, akkor maga a horpadási él teljesen csúcsos (azaz sokszög alakú), ha $b_2 = 1$, akkor lekerekített (azaz kör alakú). A modell így lehetővé teszi a körszimmetrikus és a diszkrét forgásszimmetrikus alakok közötti folytonos átmenet követését, hiszen a b_1 és b_2 paraméterek a $[0;1]$ zárt intervallum bármely értékét felvehetik. Az általunk az irodalomban fellelt modellekben ritka az ilyen átmenet lehetővé tétele [24], szinte minden publikáció a körszimmetrikus alaktól teljesen különálló esetekként kezeli a diszkrét forgásszimmetrikus alakokat, ezeket a héj csak hirtelen „ugrással”, folytonos átmenet nélkül tudja elérni. A kísérletek során sokszor azt láthatjuk, hogy a terhelés során a körszimmetrikus horpadási alakból lassan, jól megfigyelhető „fejlődéssel”, fokozatosan alakul ki a diszkrét forgásszimmetrikus (sokszög alaprajzú) horpadási alak, így ennek lehetővé tétele nyilvánvalóan a modellt pontosítja.



4. ábra

Diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alak felülnézete, metszete

A modellben szereplő héj horpadása során létrejövő egyensúlyi helyzeteket energiamódszerrel keressük. A módszer alkalmazásakor a horpadt héjban keletkező alakváltozási energia meghatározására is szükség van, ehhez a horpadt héjfelületet a 4. ábrán is látható, élek által határolt részekre lehet osztani. A modellben összesen 8 különböző típusú rész alakváltozási energiáját vesszük figyelembe, ez az egyes felületrészek nyúlási és hajlítási alakváltozási energiájából, a horpadási élek mentén keletkező vonalmenti, szintén nyúlási és hajlítási alakváltozási energiájából, illetve a csúcokban keletkező alakváltozási energiából tevődik össze.

A felületrészeken keletkező nyúlási és hajlítási alakváltozási energiát a következő általános kifejezés segítségével határoztam meg:

$$U = \int_S \frac{Et}{2(1-\nu^2)} (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + 2\nu\varepsilon_1\varepsilon_2) dS + \int_S \frac{Et^3}{24(1-\nu^2)} (\kappa_1^2 + \kappa_2^2 + 2\nu\kappa_1\kappa_2) dS \quad (14)$$

ahol U az adott felületrész alakváltozási energiája, E a Young-modulus, t a héj vastagsága, ν a Poisson-tényező, ε_1 és ε_2 a főnyúlások, κ_1 és κ_2 a fő-görbületváltozások, és a kifejezés mindkét tagját az adott felületrész S felszínén integráltuk. A nem horpadt felületrészeken is figyelembe vettük a nyúlási alakváltozási energiát (membránalakváltozási energia).

A felületrészeket határoló, azokat összekapcsoló élek mentén a Pogorelov könyvében [25] olvasható, a kör-szimmetrikus esetenél is előkerülő kifejezést használtuk Calladine és szerzőtársai [35] által módosított formában:

$$U = cEt^{2,5} \frac{\alpha^2 l}{R^{0,5}}, \quad (15)$$

ahol U az adott él alakváltozási energiája, $c = 0,19$ dimenzió nélküli konstans [25], α az adott él két oldalához csatlakozó felületrészek (élnél felvett) érintősíkjai által bezárt szög, l az él hossza, R a gömb sugara.

A horpadt héjon megjelenő élek csatlakozási pontjai csúcokat alkotnak, ahol további alakváltozási energiárészeket kell figyelembe venni. Az eredetileg gömbi geometriával rendelkező felületek gyűrődésekor keletkező csúcokat – melyek nem jöhethetnének létre izometrikus alakváltozás során, tehát nyúlási energia is keletkezik bennük a hajlítási alakváltozási energia mellett – úgynevezett s-kúpokkal közelítjük (az eredetileg sík felületek gyűrődésekor keletkező csúcok esetén a d-kúp elnevezés használatos) [1] [2]. A keletkező alakváltozási energiát közelítő kifejezés segítségével határoztuk meg.

A nyúlási alakváltozási energiárészek a felületrészek esetében nem jelentősek, az élek és csúcok mentén azonban meghatározó szerepük van, akárcsak Pogorelov modelljében [25]. A teher által végzett munka a kör-szimmetrikus esethez hasonlóan számíthatók.

A számításokat MATLAB 7.11.0 program segítségével végeztük, az egyensúlyi helyzetek keresése a beépített többváltozós minimumkeresési algoritmussal (fminsearchbnd) történt. Egy-egy számításakor rögzítettük a sokszög oldalainak (vagy csúcainak) számát (n), hiszen ez csak az egész számok körében értelmezhető. A horpadási alakot megadó többi változót (h , b_1 , b_2), illetve a teherintenzitást (f) a fizikailag lehetséges illetve vizsgálni érdemes tartományokban vettük fel.

A kísérletekkel való könnyű ellenőrizhetőség miatt a modellt elsősorban kétféle gömbhéj vizsgálatára használtuk. A vizsgálatokban a pingponglabda (anyaga: celluloid, Young-modulusa: $E = 2400 \text{ N/mm}^2$, Poisson-tényezője: $\nu = 0,3$, vastagsága: $t = 0,37 \text{ mm}$, sugara: $R = 19,5 \text{ mm}$) és egy nagyobb átmérőjű műanyag héj, a Lénárt István matematikus által rendelkezésünkre bocsátott úgynevezett Lénárt-gömb (anyaga: polietilén, Young-modulusa: $E = 2550 \text{ N/mm}^2$, Poisson-tényezője: $\nu = 0,3$, vastagsága: $t = 0,42 \text{ mm}$, sugara: $R = 102 \text{ mm}$) szerepelt. A geometriai méreteket több pingponglabda és Lénárt-gömb mérésének átlagaként vettük fel. Az anyagállandókat (E , ν) nem saját mérésekkel határoztuk meg, hanem az irodalomban [3] [28] található átlagos értékek szerint vettük fel. A kétféle héj sugár-vastagság (R/t) aránya közel egy nagyságrenddel eltér egymástól: a pingponglabdához 52,70, a Lénárt-gömbhöz 242,86 tartozik.

5. EREDMÉNYEK

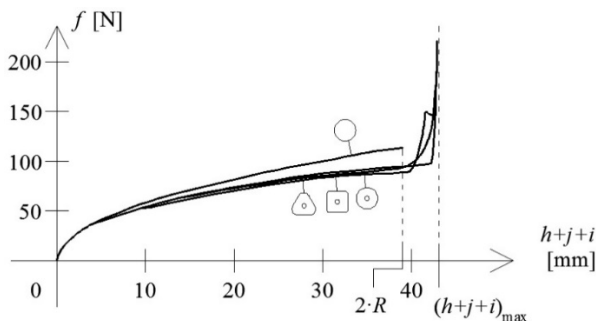
A pingponglabdára vonatkozó teher-elmozdulás diagram az 5. ábrán, a lekerekítettség-elmozdulás diagram a 6. ábrán látható. A Lénárt-gömb teher-elmozdulás diagramja a 7. ábrán, a lekerekítettség-elmozdulás diagram a 8. ábrán látható.

A teher-elmozdulás diagramokon (5. és 7. ábrák) jól látható, hogy kisebb elmozdulás (benyomódás) esetén a modell és a Pogorelov-féle, csak körszimmetrikus horpadási alak figyelembevételére képes modell egyezik (az általunk használt modell visszaadja a Pogorelov-féle eredményeket). Nagyobb elmozdulás esetén azonban tapasztalható némi eltérés: a diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alakokhoz tartozó ágak jól láthatóan lejjebb helyez-

kednek el a diagramon, mint a körszimmetrikushoz tartozó, ez magyarázza azt is, hogy a héjnak miért „éri meg” ezeket az ágakat választani.

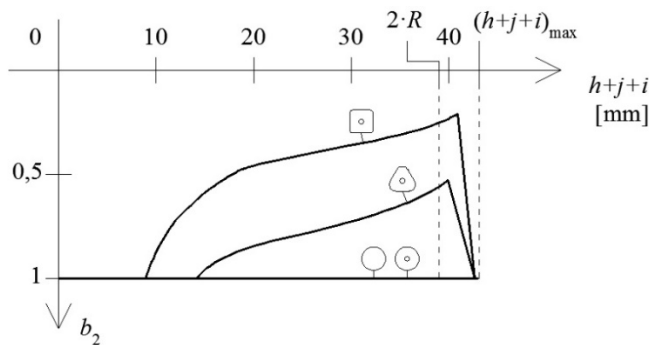
A lekerekítettség-elmozdulás diagramokon (6. és 8. ábrák) az látszik, hogy a diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alakokhoz tartozó ágak bizonyos benyomódási értékeknél hogyan ágaznak le a körszimmetrikushoz tartozó ágról. Maga a leágazás egy tisztán látható elmozdulás-értéknél történik – ilyen módon igazolhatók az irodalomban olvasható feltételezések arra vonatkozóan, hogy a diszkrét forgásszimmetrikus alakok megjelenéséhez mindig köthető egy bizonyos elmozdulás-érték –, azonban a leágazást csak később (az elmozdulás további növekedésekor) követi a sokszög teljes kifejlődése. Így tehát a sokszög megjelenéséhez tartozó elmozdulás értékének meghatározása inkább elméleti jelentőségű, a valóságban ilyenkor még nem látszik semmi körtől való eltérés a horpadt alakon. Mindenesetre újdonság, hogy a kör és a sokszög közötti átmenetet ilyen módon mutatja egy viszonylag egyszerű modell, mert szinte minden publikáció a körszimmetrikus alaktól teljesen különálló esetekként kezeli a diszkrét forgásszimmetrikus alakokat [8] [31] [32]. Még Pogorelov korábbi művében [24] is, ahol a diszkrét forgásszimmetrikus alaknak van olyan paramétere, amely lehetővé teszi az alakzat lekerekítettségének változását, a héj csak hirtelen „ugrással”, folytonos átmenet nélkül lép át a poligonális alakra.

A diagramokon megfigyelhető, hogy többféle diszkrét forgásszimmetrikus alakhoz tartozó ág létezik. Kérdésként merül fel, hogy a héj ezek közül melyiket választja. A pingponglabda esetén csak (szabályos) három- és négyszöghöz tartozó egyensúlyi utakat látunk a körszimmetrikus alakot leszámítva. Más sokszöghöz tartozó ág nem fordul elő. A három- és négyszöghöz tartozó ág egymáshoz nagyon közel helyezkedik el a teher-elmozdulás diagramon (5. ábra), de viszonylag messze helyezkednek el egymástól a lekerekítettség-elmozdulás diagramon (6. ábra). Ez arra utal, hogy a héj horpadás során vagy csak az egyik, vagy csak a másik sokszöghöz tartozó alakot veszi fel, a kettő között (ebben a modellben) nincs közvetlen átjárás. A Lénárt-gömb esetén csak (szabályos) öt- és hatszöghöz tartozó egyensúlyi utakat látunk a körszimmetrikus alakot leszámítva. Más sokszöghöz tartozó ág nem fordul elő. Az öt- és hatszöghöz tartozó ág egymáshoz nagyon közel helyezkedik el a teher-elmozdulás diagramon (7. ábra) és a lekerekítettség-elmozdulás diagramon (8. ábra) is. Ez arra utal, hogy a héj horpadás során könnyen válthat a két különböző sokszöghöz tartozó alak között. A két különböző konfigurációt megjelenítő ág között (ebben a modellben) elvileg nincs közvetlen átjárás. Gyakorlatilag azonban a modellben alkalmazott közelítések pontatlansága miatt a két ágot egybeesőnek feltételezhetjük. A pingponglabdára és a Lénárt-gömbre kapott eredményeket a kísérletek és végelesemes vizsgálatok is igazolják [34].



5. ábra

Pingponglabda teher-elmozdulás diagramja



6. ábra

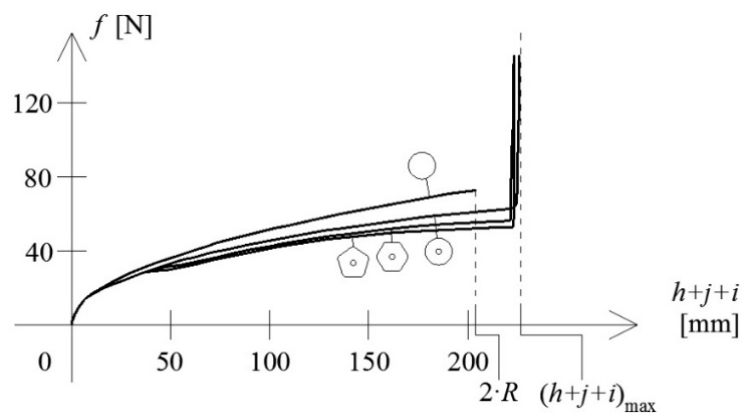
Pingponglabda lekerekítettség-elmozdulás diagramja

Vaziri és szerzőtársa [31] [32] szerint a háromszögtől kezdve a szabályos sokszögek teljes sora megjelenik a horpadás során minden gömbhéj esetén. Ezt az általunk elvégzett vizsgálatok nem igazolják: a lehetséges sokszögek közül nem mindegyik jelenik meg egy adott héj esetén. Az említett kutatók szerint a nagyobb R/t aránnyal rendelkező héjak esetén az egyes sokszögek megjelenéséhez (tehát a körből vagy az alacsonyabb oldalszámú sokszögből történő átalakuláshoz) kötődő benyomódási értékek kisebbek, mint a kisebb R/t aránnyal rendelkező héjak esetén. Tehát a nagyobb sugár-vastagság arányú héjak esetén az értelmezési tartomány nagyobb részén látunk nagyobb oldalszámú sokszögeket, mint a kisebb sugár-vastagság arányú héjak esetén. Ezt igazolják az általunk a pingponglabdára és a Lénárt-gömbre kapott eredmények.

Az 5., 6., 7. és 8. ábrákon a lehetséges legnagyobb benyomódásokat is jelöltük. Ez ahhoz az állapothoz tartozik, amelynél a horpadási él kör alakú ($b_2 = 1$), $r = R$ sugarú, de az ezen belül található rész csúcsos ($b_1 = 0$). Ebben az esetben a héj önmagát átmetszi, tehát a meghatározása elméleti jelentőségű, kísérletek során nem jöhet létre. A lehetséges legnagyobb benyomódás:

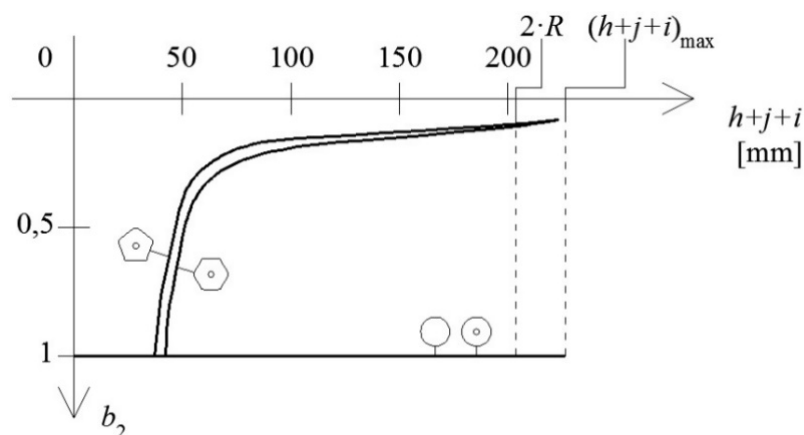
$$(h+i+j)_{\max} = R \left(1 + \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1} \right) \cong 2,21R, \quad (16)$$

melynek értéke pingponglabda esetén 43,12 mm, Lénárt-gömb esetén 225,26 mm. A héj ezt az állapotot azért sem érheti el, mert végtelenül nagy koncentrált erő esetén jöhet létre. Az 5., 6., 7. és 8. ábrákon a Pogorelov-féle kör-szimmetrikus modell szerint lehetséges legnagyobb benyomódásokat is jelöltük.



7. ábra

Lénárt-gömb teher-elmozdulás diagramja



8. ábra

Lénárt-gömb lekerekítettség-elmozdulás diagramja

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A cikkben bemutatott analitikus modell a koncentrált teherrel terhelt gömbhéjak viselkedésének leírására alkalmas. A modellben lehetőség nyílik a körszimmetrikus és a diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alakok együttes, azaz egy modellen belüli figyelembevételére úgy, hogy ezek között a horpadási alakok között folytonos átmenet is létrejöhet. Az eddig megjelent publikációkban ilyenrel nem lehet találkozni, a körszimmetrikus és a diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alakok közötti átmenet ugrásszerűen, hirtelen következik be. Ennek többek között a kísérleti eredmények is ellentmondanak, hiszen sokszor azt láthatjuk, hogy a terhelés során a körszimmetrikus horpadási alakból lassan, jól megfigyelhető „fejlődéssel”, fokozatosan alakul ki a diszkrét forgásszimmetrikus (sokszög alaprajzú) horpadási alak. Bemutattuk, hogy a modell segítségével a körszimmetrikus és a diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alakok közötti folytonos átmenet eredményesen vizsgálható.

A modell használatával kapott teher-elmozdulás összefüggések a körszimmetrikus és az egyes sokszögekhez tartozó, diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alakok esetén eltérnek. Ennek az eltérésnek a szükségszerűségét támasztja alá az a levezetés, melynek eredményéül adódott, hogy a körszimmetrikus és a diszkrét forgásszimmetrikus alak nem vihető át egymásba nyúlásmentes alakváltozások segítségével. Ezért van szükség a polygonális horpadási alak figyelembevételére a gömbhéjak horpadásának vizsgálata során. Bemutattuk, hogy a modell segítségével a körszimmetrikus és a diszkrét forgásszimmetrikus horpadási alakokhoz tartozóan pontosabb teher-elmozdulás összefüggés adható meg, mint amelyek a korábbi publikációk tanúsága szerint eddig analitikus úton nyerhetők voltak.

A modell használatával eredményül adódott, hogy kisebb sugár-vastagság arányú héjak esetén (ilyen például a pingponglabda) alacsonyabb oldalszámú sokszögek jöhetnek létre (három- és négyszög), nagyobb sugár-vastagság arányú héjak esetén (ilyen például az általam vizsgált úgynevezett Lénárt-gömb) pedig magasabb oldalszámú sokszögek (öt- és hatszög). Így arra a kérdésre, hogy milyen lehet egy adott gömbhéj horpadási alakja, és ehhez milyen teher-elmozdulás összefüggés tartozik, a bemutatott modell képes választ adni. A bemutatott modell szerint egy héj esetén többféle horpadási sokszög is létrejöhet. Ebben a cikkben nem szerepelnek az elméleti eredményeket alátámasztó kísérleti és vége-selemes vizsgálatok eredményei [34].

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Audoly, B., Pomeau, Y.: *Elasticity and geometry*, Oxford University Press, Oxford, 2010
- [2] Ben Amar, M., Pomeau, Y.: Crumpled paper, *Proceedings of the Royal Society London A*, **453**, 1997, pp. 729-755.
- [3] Blaise, A., André, S., Delobelle, P., Meshaka, Y., Cunat, C.: Identification of the true elastic modulus of high density polyethylene from tensile tests using an appropriate reduced model of the elastoviscoplastic behavior, arXiv:1206.4268v1, 2012
- [4] Bushnell, D.: Bifurcation phenomena in spherical shells under concentrated and ring loads, *AIAA Journal*, **5/11**, 1967, pp. 2034-2040.
- [5] Croll, J. G. A.: Towards simple estimates of shell buckling loads, *Der Stahlbau*, **9**, 1975, pp. 283-285.
- [6] Csonka P.: *Héjszerkezetek*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1981
- [7] Evkin, A. Yu.: Large deflections of deep orthotropic shells under radial concentrated load: asymptotic solution, *International Journal of Solids and Structures*, **42**, 2005, pp. 1173-1186.
- [8] Fitch, J. R.: The buckling and post-buckling behavior of spherical caps under concentrated load, *International Journal of Solids and Structures*, **4**, 1968, pp. 421-446.
- [9] Forgács G.: Fizika a biológiában, *Fizikai Szemle*, **3**, 1996, pp. 95-101.
- [10] Galpin, B., Grolleau, V., Umiastowski, S., Rio, G., Mahéo, L.: Design and application of an instrumented projectile for load measurements during impact, *International Journal of Crashworthiness*, **13/2**, 2008, pp. 139-148.
- [11] Grolleau, V., Galpin, B., Penin, A., Rio, G.: Modeling the effect of forming history in impact simulations: evaluation of the effect of thickness change and strain hardening based on experiments, *International Journal of Crashworthiness*, **13/4**, 2008, pp. 363-373.
- [12] Gupta, N. K., Mohamed Sheriff, N., Velmurugan, R.: Experimental and theoretical studies on buckling of thin spherical shells under axial loads, *International Journal of Mechanical Sciences*, **50**, 2008, pp. 422-432.
- [13] Hegedűs I., *Héjszerkezetek*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1998
- [14] Ivanova, J., Pastrone, F.: *Geometric method for stability of non-linear elastic thin shells*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002
- [15] Knoche, S., Kierfeld, J.: The secondary buckling transition: wrinkling of buckled spherical shells, *European Physical Journal E*, **37/7**, 2014, pp. 1-21.
- [16] Kollár, L., Dulácska, E.: *Buckling of Shells for Engineers*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1984

- [17] Lobkovsky, A. E.: Structure of Crumpled Thin Elastic Membranes, PhD disszertáció, University of Chicago, Department of Physics, Chicago, 1996
- [18] Menyhárd I.: *Héjszerkezetek*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1966
- [19] Moulton, D. E., Goriely, A., Chirat, R.: Mechanical growth and morphogenesis of seashells, *Journal of Theoretical Biology*, **311**, 2012, pp. 69-79.
- [20] Niordson, F. I.: *Shell theory*, Elsevier, Amszterdam, 1985
- [21] Pauchard, L., Rica, S.: Contact and compression of elastic spherical shells: the physics of a 'ping-pong' ball, *Philosophical Magazine B*, **78/2**, 1998, pp. 225-233.
- [22] Penning, F. A.: Nonaxisymmetric behavior of shallow shells loaded at the apex, *Journal of Applied Mechanics*, **33**, 1966, pp. 699-700.
- [23] Pogorelov, A. V.: *Die Verbiegung konvexer Flächen*, Akademie-Verlag, Berlin, 1957
- [24] Pogorelov, A. V.: Stability of axially symmetric deformations of spherical shells under axially symmetric load, NASA Contract TT F-8628, ST-SM-10050, Arlington, 1963
- [25] Pogorelov, A. V.: *Bendings of Surfaces and Stability of Shells*, American Mathematical Society, Providence, 1988
- [26] Quilliet, C., Zoldesi, C., Riera, C., Blandaren, A. van, Imhof, A.: Anisotropic colloids through non-trivial buckling, *European Physical Journal E*, **27**, 2008, pp. 13-20.
- [27] Ramm, E., Wall, W. A.: Shell structures – a sensitive interrelation between physics and numerics, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **60**, 2004, pp. 381-427.
- [28] Ruan, H. H., Gao, Z. Y., Yu, T. X.: Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays, *International Journal of Mechanical Sciences*, **48**, 2006, pp. 117-133.
- [29] Tarnai, T.: Buckling patterns of shells and spherical honeycomb structures, *Computers and Mathematics with Applications*, **17/4-6**, 1989, pp. 639-652.
- [30] Thang, C. Q.: A gömbhéj szimmetrikus horpadása, *Építés-Építészettudomány*, **21/1-2**, 1989, pp. 95-108.
- [31] Vaziri, A., Mahadevan, L.: Localized and extended deformations of elastic shells, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105/23**, 2008, pp. 7913-7918.
- [32] Vaziri, A.: Mechanics of highly deformed elastic shells, *Thin-Walled Structures*, **47**, 2009, pp. 692-700.
- [33] Vető, D., Sajtó, I.: Application of geometric method to determine the buckling load of spherical shells, *Pollack Periodica*, **4/2**, 2009, pp. 123-134.
- [34] Vető D., Sajtó I.: Geometriai módszer alkalmazása gömbhéjak horpadásának vizsgálatához, *Építés-Építészettudomány*, **42/3-4**, 2014, pp. 239-257.
- [35] Zhu, E., Mandal, P., Calladine, C. R.: Buckling of thin cylindrical shells: an attempt to resolve a paradox, *International Journal of Mechanical Sciences*, **44**, 2002, pp. 1583-1601.