

# GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



**PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM  
POLLACK MIHÁLY MŰSZAKI KAR**

**2010/4.**

52 oldal  
LXI. évfolyam

**Alapozd meg sikeres jövődet Pollack Műszaki Karunk képzéseivel!**

**Pollack - a siker kapuja. Lépj be!**

**Bizonyosodj meg, hogy valóban a Pollack a legjobb választás számodra.  
Tervezz jól, légy Te is Pollackos, tartozz közénk!**

**PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM**

# **POLLACK MIHÁLY MŰSZAKI KAR**

## **PIACKÉPES TUDÁS**

### **MSc:**

ÉPÍTÉSZ (osztatlan)  
SZERKEZET-ÉPÍTŐMÉRNÖK  
TELEPÜLÉSMÉRNÖK  
SZERKEZETTERVEZŐ ÉPÍTÉSZMÉRNÖK  
TERVEZŐ ÉPÍTÉSZMÉRNÖK  
TANÁR- MÉRNÖKTANÁR

### **BSc KÉPZÉS:**

ÉPÍTÉSZMÉRNÖK  
ÉPÍTŐMÉRNÖK  
ÉPÍTŐMŰVÉSZ (BA)  
GÉPÉSZMÉRNÖK  
IPARI TERMÉK ÉS FORMATERVEZŐ  
KÖRNYEZETMÉRNÖK  
MÉRNÖK INFORMATIKUS  
VILLAMOSMÉRNÖK

### **FSZ (FELSŐFOKÚ SZAKKÉPZÉS):**

ÉPÍTETTKÖRNYEZETMÉRNÖK-ASSZISZTENS  
MÉDIATECHNOLÓGUS ASSZISZTENS  
MŰSZAKI INFORMATIKAI MÉRNÖKASSZISZTENS  
TELEVÍZIÓMŰSOR-GYÁRTÓ SZAKASSZISZTENS  
VILLAMOS MÉRNÖKASSZISZTENS  
WEB-PROGRAMOZÓ

### **TOVÁBBI INFORMÁCIÓ:**

**[HTTP://PMMK.PTE.HU/](http://PMMK.PTE.HU/)**

**PTE PMMK ♦ 7624 PÉCS, BOSZORKÁNY U. 2.**

**TEL:06 72 503 650 ♦ FAX: 06 72 501 533**

# GÉP

## A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

műszaki, vállalkozási, befektetési, értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

### SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczeni Ádám  
elnök

Dr. Kálmán András  
főszerkesztő  
Dr. Péter József  
Dr. Szabó Szilárd  
főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczy István  
Bányai Zoltán  
Dr. Beke János  
Dr. Bercsey Tibor  
Dr. Bukoveczky György  
Dr. Czitán Gábor  
Dr. Danyi József  
Dr. Dudás Illés  
Dr. Gáti József  
Dr. Horváth Sándor  
Dr. Illés Béla  
Dr. Jármái Károly  
Kármán Antal  
Dr. Kulcsár Béla  
Dr. Kalmár Ferenc  
Dr. Orbán Ferenc  
Dr. Pálinkás István  
Dr. Patkó Gyula  
Dr. Péter László  
Dr. Penninger Antal  
Dr. Rittinger János  
Dr. Szabó István  
Dr. Szántó Jenő  
Dr. Tímár Imre  
Dr. Tóth László  
Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

Szerkesztésben közreműködött:  
Dr. Orbán Ferenc

### KEDVES OLVASÓ!



A Pollack Mihály Műszaki Kart gyakorlatilag 40 éve alapították. Abban az időben önálló intézmény volt a Pollack Mihály Műszaki Főiskola. Az új főiskola oktatóit két korábban létesített felsőfokú technikumból verbuválták.

Amiért e szám szerkesztői lehettünk, az a tény szolgáltatta, hogy Pécs 2010-ben Európa kulturális fővárosa.

Az 1970-es alapításkor két kar működött, az Építőipari és Gépészeti Karok.

Jelenleg mind a képzési kínálat, mind pedig a most már önálló kar szerkezeti formája is átalakult.

A Pollack Mihály Műszaki Főiskola 1995-ben megszűnt, mint önálló intézmény, és a pécsi Janus Pannonius Tudományegyetem önálló kara lett. Időközben több szakon egyetemi képzést sikerült beindítani pl. építész, építőművész, építőmérnök, urbanisztika, így most a kar neve Pollack Mihály Műszaki Kar.

2003-tól működik a doktori iskola a karon, amely mostanra kissé átalakult és az év elején Breuer Marcell Doktori Iskola néven akkreditálták.

Az átalakult doktori iskolában az építőművészet területén DLA, az építőmérnök tudományban pedig PhD fokozat szerezhető.

A PMMK földrajzi helyzetéből következően is a régió műszaki tudásközpontjává vált. A régióban működő vállalatok gyakran fordulnak hozzánk műszaki problémáikkal és ezen vállalatoknál talál munkát hallgatóink többsége is.

A Kar szervezeti felépítéséről annyit, hogy négy önálló intézettel és két önálló tanszékkel működik.

A folyóiratban megjelenő cikkekből négyet a Gépészeti Intézet oktatói, egyet a Műszaki Informatika és egyet a Matematika Tanszék oktatói írtak. A folyóirat fedőlapján a felújított Pollack épülete látható, amely 2009-ben Építőipari Nívódíjat kapott.

Pécs, 2010. május

*Dr. Bachmann Bálint  
dékán*

A szerkesztésért felelős: dr. Kálmán András. A szerkesztőség címe: 3529 Miskolc, Budai József u. 46.

Telefon/fax: (46) 325-504, 20/9358-812 • e-mail: kaests@t-online.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1027 Budapest, Fő u. 68. Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: 202-0656, fax: 202-0252, e-mail: ficze.gte@mtesz.hu, internet: www.gte.mtesz.hu

A GÉP Internetcíme: <http://members.chello.hu/cocom/gep/gep-index.htm>

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: DR. IGAZ JENŐ ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Tel.: (46) 379-530 E-mail: gazdasz@chello.hu Felelős vezető: Vesza József

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Rt. Hírlap Üzletága 1008 Budapest, Orczy tér 1.

Előfizethető valamennyi postán, kézbesítőknél, e-mailen: [hirlapelofizetes@posta.hu](mailto:hirlapelofizetes@posta.hu), faxon: 303-3440. További információ: 06 80/444-444

Egy szám ára: 1000 Ft + áfa. Dupla szám ára: 2000 Ft + áfa.

Előfizetés negyedévre: 3000 Ft + áfa, fél évre: 6000 Ft + áfa, egy évre: 12 000 Ft + áfa.

Külföldön terjeszti a Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat,  
H-1389 Budapest, Pf. 149. és a Magyar Média, H-1392 Budapest, Pf. 272.

Előfizethető még közvetlenül a szerkesztőségben is.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

**A megjelent cikkek lektoráltak.**

# TARTALOM

1. Katona T.; Rátkai S.; Jánosiné Bíró Á.:  
**A Paksi Atomerőmű VVER-440/213 típusú blokkjai üzemidejének meghosszabbítása .....3**  
*Szerzők bemutatják a paksi atomerőmű VVER-440/213 blokkjai biztonságos hosszú távú üzemeltetését biztosító, annak elfogadhatóságát igazoló rendszert, amelynek fő elemei az erőmű állapotának értékelése, az öregedés-kezelési programok megfelelőségének igazolása, valamint az élettartamot korlátozó öregedési folyamatok elemzéséből származó korlátok felülvizsgálata.*
2. Magyar Z.; Baumann M.:  
**Társasházak energia-hatékony felújítási lehetőségei (ECOLISH projekt) .....12**  
*Az Európai Unió az épületek energiaigényének kielégítésére a teljes energiafelhasználás 40-42%-át fordítja. Az Európai Unió „Intelligens Európa” programjának támogatásával megvalósult ECOLISH projekt célja az Európai Unión belül különböző földrajzi fekvésű, anyagilag szűkös körülmények között élők lakásainak energiacsökkentése.*
3. Meiszterics Z.:  
**Nitinol huzal és titán csap hegesztése .....17**  
*Szerző két hallgatói diplomamunkára alapozott kutatásként egy mikrohegesztési feladat megoldását mutatja be, amelyben orvosi alkalmazás céljából egy Nitinol (Ti-Al-V ötvözet) alapanyagú, Ø1,4 mm-es huzalt és egy Ø3 mm-es furatos csapot kellett összehegeszteni. A mikro-lézerhegesztés problémái miatt végül az ellenálláshegesztés mellett döntöttek.*
4. Perjési-Hámori I.:  
**A hőátszármasztatás kétdimenziós matematikai modelljének analitikus és numerikus megoldása speciális peremfeltételek mellett .....23**  
*A mérnökök által megfogalmazott hővezetési problémák nehezen kezelhető parciális differenciálegyenletekre vezetnek. A számítógépes algebra segítségével ezek az egyenletek könnyebben megoldhatók, a megoldások pedig azok számára is érthetőek, akik az adott területen kevés rutinnal rendelkeznek.*
5. Stampfer M.:  
**A fogaskerékes hajtóművek fokozatszámának meghatározása .....28**  
*A hajtóműtervezés korai szakaszában el kell dönteni, hogy egy kívánt áttételt hány fokozattal valósítanak meg. A döntés eddig tapasztalati alapon történt. Szerző a cikkben olyan matematikai összefüggéseket mutat be, amelyekkel megállapítható az egy fokozatban megvalósítható áttétel optimális értéke.*
6. Tukora B.; Szalay T.:  
**Az új generációs grafikus hardverek bevonása a megmunkálás-szimulációs eljárásokba .....35**  
*A nem csak grafikus feladatokat végző grafikus hardverek új generációjának megjelenésével a grafikus és numerikus feladatok magas szintű párhuzamos futása vált lehetővé. A cikk az új módszer alkalmazhatóságát tetszőleges alakú munkadarabok anyagválasztási szimulációjának példáján keresztül mutatja be.*

# A PAKSI ATOMERŐMŰ VVER-440/213 TÍPUSÚ BLOKKJAI ÜZEMIDEJÉNEK MEGHOSSZABBÍTÁSA

## EXTENSION OF OPERATIONAL LIFETIME OF WWER-440/213 TYPE UNITS AT PAKS NPP

Dr. Katona Tamás János\*, Rátkai Sándor\*\*, Jánosiné Bíró Ágnes\*\*\*

### ABSTRACT

*Operational license of WWER-440/213 units at Paks NPP, is limited to the design lifetime of 30 years. Evaluation of plant condition performed in 2000 has shown that prolongation by additional 20 years of the operational lifetime is feasible, if the strict regulatory requirements are met. Moreover, enhancement of the reactor thermal power by 8% will increase both the net power output and the competitiveness of the plant. A regulatory framework and a comprehensive engineering practice have been developed during last decade for ensuring the safety of long-term operation via creative adaptation of best practices and with proper consideration of WWER-440/V213 features. That systematic engineering approach is in the focus of recent paper. Key elements of justification and measures ensuring the safety of long-term operation of Paks NPP WWER-440/213 units are identified and discussed in the paper. These are the assessment of plant condition and review of adequacy of ageing management programmes, also the review, validation and reconstitution of time limited ageing analyses as core tasks of license renewal.*

### KIVONAT

A paksi atomerőmű VVER-440/213 blokkjai üzemeltetési engedélyének érvényessége a 30 éves tervezési élettartamra korlátozódik. A 2000-ben elvégzett állapot-értékelés alapján megállapítható volt, hogy az atomerőmű üzemideje még 20 évvel meghosszabbítható, amire szigorú feltételek teljesítése esetén a jogszabályok lehetőséget adnak. A műszaki lehetőség mellett az üzemidő hosszabbításra vonatkozó döntést még az üzleti célszerűség is alátámasztja. Emellett a reaktor hőteljesítményének 8%-kal történő megnövelése a közelmúltban az erőmű versenyképességének fokozását eredményezte.

Az eltelt tíz évben a nemzetközi gyakorlat kreatív adaptálásával, a VVER-440/213 típusú blokkok sajátosságai és üzemeltetési tapasztalatai megfelelő figyelem-

bevétele mellett egy átfogó műszaki és jogi feltétel-rendszer és módszer alakult ki, ami a hosszú távú üzemeltetés biztonságát szavatolja. Jelen dolgozatban bemutatjuk a paksi atomerőmű VVER-440/213 blokkjai biztonságos hosszú távú üzemeltetését biztosító, annak elfogadhatóságát igazoló rendszert, amelynek fő elemei az erőmű állapotának értékelése, az öregedés-kezelési programok megfelelőségének igazolása, valamint az élettartamot korlátozó öregedési folyamatok elemzéséből származó korlátok felülvizsgálata.

### BEVEZETÉS

A Paksi Atomerőmű négy, VVER-440/213 blokkja a tervezett és engedélyezett 30 éves üzemidő utolsó éveivel közelít. A 2000-ben készített részletes megvalósíthatósági tanulmány szerint lehetőség van az üzemidő további 20 évvel történő meghosszabbítására, mivel – köszönhetően az üzemeltetési és karbantartási gyakorlatnak, a szerkezetek és rendszerelemek robusztus konstrukciójának, illetve a számos felújításnak és biztonságnövelő intézkedésnek – az erőmű állapota lehetővé teszi a további biztonságos üzemelést. A reaktor hőteljesítményének 8 %-os növelésével a nettó teljesítmény is növekszik (440 MWe-ről kb. 510 MWe-re), melynek következtében tovább erősödtek az erőmű piaci pozíciói és nőtt versenyképessége, ami a hosszú távú üzemeltetés gazdasági ésszerűségét is alátámasztja. A paksi atomerőmű hosszú távú üzemeltetését Magyarország lakossága széles körben támogatja. A magyar nukleáris biztonsági szabályozás szerint az üzemeltetési engedély megújítása szükséges az üzemidő meghosszabbítása esetén, amely engedélyezési eljárásnak jól meghatározott célja és terjedelme van.

Az üzemidő biztonságos és gazdaságilag ésszerű meghosszabbítását azonban komplex módon kell értelmezni, s nem szabad csak a formális újraengedélyezési szempontokra korlátozni. Egyfelől az üzemidő meghosszabbítása megkövetel egy sajátos üzemeltetői attitűdöt, amely előtérbe helyez bizonyos tevékenységeket és képességeket, mint:

- a saját és az azonos típusú blokkok jellemző öregedési jelenségeinek ismerete,
- az öregedési folyamatok monitorozással, öregedéskezeléssel megvalósított felügyelete,

\*tudományos tanácsadó, Paksi Atomerőmű Zrt, katonat@npp.hu

\*\*osztályvezető, Paksi Atomerőmű Zrt, ratkai@npp.hu

\*\*\* projektvezető, Villamosenergetikai Kutatóintézet, janosi@hu.inter.net

- a korábban nem tapasztalt öregedési jelenségek felismerésének képessége,
- a jó üzemeltetői gyakorlat és tapasztalatok átvétele és alkalmazása, a tapasztalatok visszacsatolása.

Másfelől a biztonságos és gazdaságos továbbüzemelés megvalósításához s egy olyan üzemeltetői gyakorlatra van szükség, amely az alkalmazott műszaki eszközök, módszertanok és ellenőrzési folyamatok mindenre kiterjedő, teljes rendszerét eredményezik.

A teljességet az alábbiak szerint értelmezzük:

- az üzemeltetői programok összességének – ami magában foglalja az öregedéskezelési, a tervszerű megelőző karbantartási, felújítási, stb. programokat – le kell fedni az erőmű összes rendszerét, rendszerelemét (RRE);
- biztonsági osztályba sorolt RRE esetén az erőművi programoknak és gyakorlatnak meg kell felelniük a hatósági előírásoknak; alkalmazni kell és célszerű a biztonsági relevancia szerint differenciálás elvét;
- biztonsági osztályba nem sorolt rendszerelem esetén a program komplexitása attól függ, hogy az adott RRE mennyire fontos az energiatermelés szempontjából, így alkalmazható például a tervszerű megelőző karbantartás és néhány esetben a meghibásodásig tartó működés elve is;
- minden öregedési folyamatot figyelembe kell venni;
- minden erőművi programot, tevékenységet figyelembe kell venni, azaz a rutinszerű fenntartási tevékenységet és a hosszú távú üzemeltetés szempontjából specifikus tevékenységet egy egységben kell kezelni, kihasználva a kettő közötti szinergiákat.

Nyilvánvaló, hogy a fentiekben vázolt rendszer értéke nem annak tudományos újdonságából ered, hanem az erőművi öregedési problémák kezelését szolgáló kipróbált módszerek kreatív alkalmazásából úgy, hogy közben megvalósul egy sajátos egyensúly az üzemeltetés biztonsága és gazdaságossága között. A paksi atomerőmű hosszú távú üzemeltetésének és engedély megújításának leírását az [1] és [2] irodalom tartalmazza.

A fent vázolt elvek szisztematikus alkalmazását a paksi atomerőmű esetében azzal a céllal mutatjuk be, hogy az demonstrálja, miként lehet és kell a hosszú távú üzemeltetési gyakorlatot az adott erőműre kialakítani, figyelembe véve az erőmű konstrukciójának sajátosságait, a nemzeti szabályozásokat és az erőmű meglévő gyakorlatát. Bemutatjuk, hogy bármely egyedi üzemeltetői gyakorlat megfelelő lehet, ha követi a teljesség fent vázolt alapelvét.

## **A BIZTONSÁG HOSSZÚ TÁVÚ MEGVALÓSÍTÁSÁNAK KONCEPCIÓJA**

### **A szabályozási háttér**

Az erőmű biztonságát hosszútávon garantáló szabályozási rendszernek az alábbiakra kell kiterjedni:

- a) létezzenek hatósági eszközök annak ellenőrzésére, hogy az erőmű megfelel az engedély-feltételeknek;
- b) az üzemeltetési engedély megújításánál ellenőrizni kell, hogy az élettartamot korlátozó szerkezetek és rendszerelemek teljesítik e biztonsági funkciójukat a meghosszabbított üzemidő végéig;
- c) létezzenek hatósági eszközök annak ellenőrzésére, hogy az üzemeltető tevékenysége teljes körű és megfelelő az a) és b) pont vonatkozásában.

A magyar szabályozásoknak megfelelően, az aktuális engedélyezési alapnak történő megfelelés ellenőrzése megvalósul az évenként aktualizált Végleges Biztonsági Jelentéssel (VBJ) és a rendszeres hatósági ellenőrzésekkel, engedélyekkel. A VBJ tartalma hasonló az USA nukleáris biztonsági hatósága, az US NRC 1.70 hatósági irányelvében megköveteltekhez. A VBJ tartalmazza a tervezési alapot is.

Az Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat (IBF) az erőmű biztonságának átfogó értékelésére szolgál, ami bár nem eszköze az üzemeltetés engedélyezésének, de a felülvizsgálat eredménye alapján a hatóság az üzemeltetési engedélyre vonatkozóan korlátozásokat és feltételeket fogalmazhat meg, illetve biztonságnövelő intézkedéseket írhat elő. A felülvizsgálat hazai szabályozása és gyakorlata lényegében azonos a NAÜ NS-G-2.10 Biztonsági Irányelvben leírtakkal.

A magyar szabályozás szerint a működést és a biztonsági funkciók ellenőrzését és/vagy meghatározott erőművi programmal kell biztosítani, vagy annak meglétét elemzéssel kell igazolni. Ez utóbbiak a KIBE<sup>1</sup> betűszóval illetett elemzések, amelyek az öregedési folyamatok, mint például a fáradás elemzései, amelyekből az élettartamra vonatkozó korlátok származnak.

A passzív, hosszú élettartamú szerkezetek és rendszerelemek működő és teljesítő képességét öregedéskezelési programokkal kell biztosítani. Az aktív rendszerek működőképességét karbantartással kell biztosítani, s üzem közben ellenőrizni kell (és a passzív rendszerelmektől eltérően lehet is). A karbantartás megfelelőségét biztonsági kritériumok alapján kell értékelni. Az aktív és egyes passzív rendszerelemek megfelelőségét környezetállósági minősítéssel és a minősített állapot fenntartását szolgáló programokkal lehet elérni. Az üzemeltető kiválaszthatja és optimalizálhatja, milyen módszert alkalmaz egy adott rendszerelem esetében a megkövetelt állapot fenntartására, de az erőművi gyakorlatnak teljes körűnek kell lennie, azaz a rendszernek ki kell terjednie a biztonsági funkciókat befolyásoló összes rendszerre és rendszerelemre, illetve romlási mechanizmusra. nyilvánvaló, hogy alkalmazni kell a biztonság szerinti differenciálás elvét is, ahogy azt a bevezetőben hangsúlyoztuk.

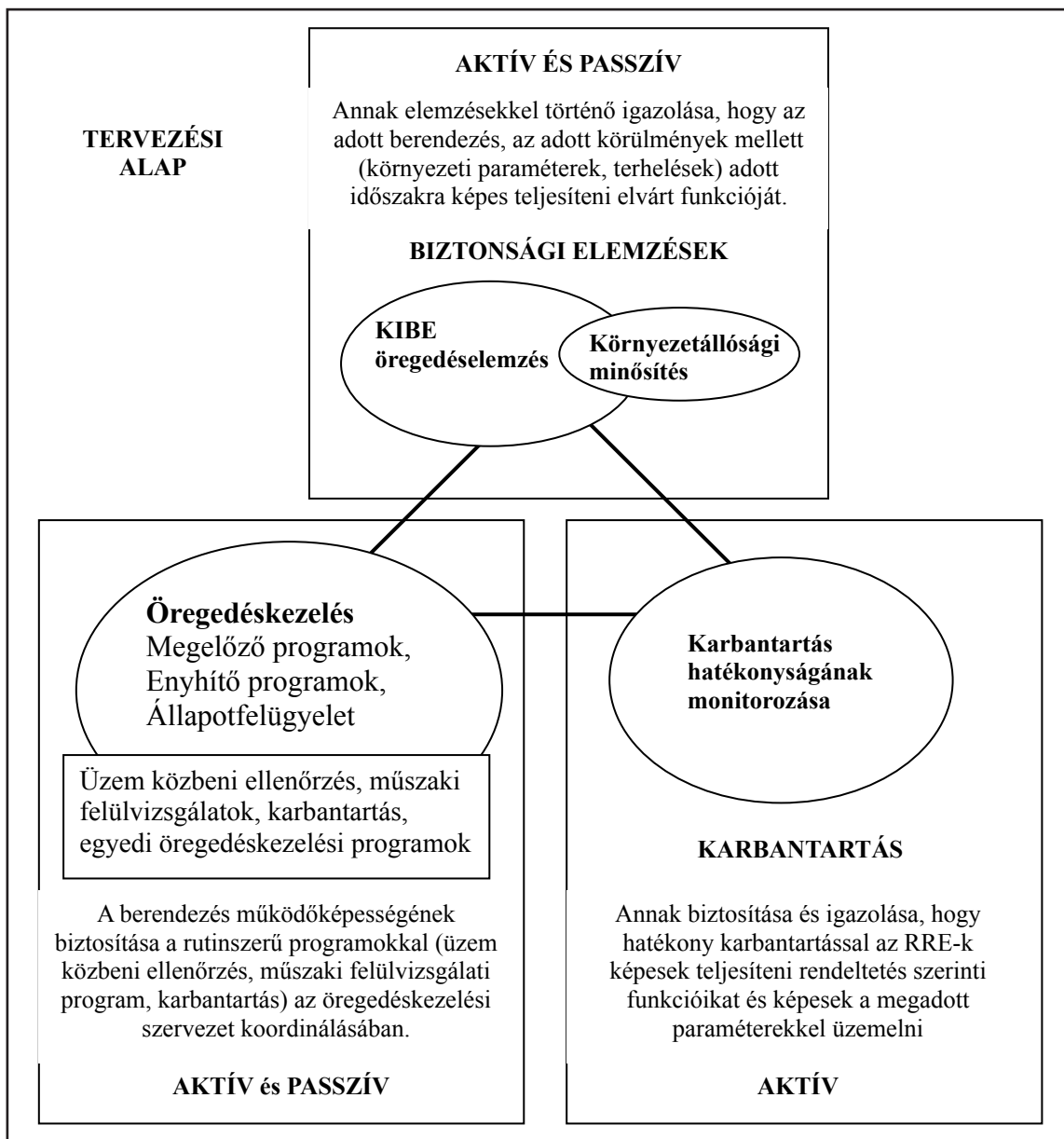
A biztonság szempontjából kiemelkedő jelentőségű passzív szerkezetek és rendszerelemek esetén az üzemeltető választási lehetősége korlátozott, a szabályozás speciális öregedéskezelési programok végrehajtását írja elő. A zord környezeti körülmények között üzemelő

<sup>1</sup> Korlátozott Időre érvényes Biztonsági Elemzések - KIBE

rendszerek esetén a környezeti minősített állapot fenntartására irányuló speciális program szükséges. A magyar szabályozás fent bemutatott koncepcióját a magyarországi Nukleáris Biztonsági Szabályzat (NBSZ) 4.12. számú útmutatója [3] alapján készített 1. ábra szemléltet, ami megfelel a fokozatos megközelítés elvének.

osztályba sorolt szerkezetek és rendszerelemek állapotát, öregedéskezelését és várható élettartamát. Ez az eljárás nagyon hasonlít az USA engedélymegújítási előírásaihoz (10 Code of Federal Regulation Part 54).

A magyarországi szabályozás azonban néhány területen eltér az amerikai engedélymegújítási szabályoktól. A



1. ábra: A biztonsági funkciók és a működőképesség teljesítése igazolásának lehetséges módjai az előírt teljesítmény paraméterek szerint (1÷3 és + biztonsági osztályok)

Az egyes kööttségek ellenére ez a rendszer lehetőséget nyújt az erőmű erőfeszítéseinek optimalizálására mindamellet, hogy biztosítja, hogy az erőművi gyakorlat mindenre kiterjedő, hiánytalan lesz a fent említett értelemben.

Az engedélymegújítás egy olyan tevékenység, amikor a szabályozó hatóság gyakorlatilag az összes engedélyezési feltételt ellenőrzi az erőmű élettartamának korlátai szempontjából: a hosszú élettartamú, passzív, biztonsági

leglényegesebb az, hogy a hazai előírások szerint el kell készíteni az üzemidő hosszabbítást szolgáló programot, amelyet ellenőrzésre a hatósághoz kell benyújtani legkésőbb az üzemeltetési engedély lejárta előtt négy évvel, azaz a paksi atomerőmű esetében 2008 végén.

Az üzemidő hosszabbítási program (a továbbiakban: program) megalapozásához az erőmű állapotának és az üzemeltető állapot fenntartási gyakorlatának átfogó

felmérésére van szükség, amely alapján meghatározhatók az üzemeltető gyakorlatot érintő intézkedések és módosítások, amelyekkel biztosítható a továbbüzemelés lehetősége. A program végrehajtásának első három éve után a tapasztalatokat értékelni kell, és az eredményeket össze kell foglalni az engedélymegújítási kérelemben, és igazolni kell, hogy az erőművi üzemeltetési és állapotfenntartási gyakorlat hatékony az erőmű hosszú távú üzemeltetésének biztonsága szempontjából.

A program középpontjában az öregedéskezelési programok és az élettartam korlátokat meghatározó öregedés-elemzések (KIBE) felülvizsgálatának eredményei és következtetései, valamint ezen felülvizsgálatokból származó intézkedések állnak, amelyet kiegészítenek a karbantartás hatékonyságának, a környezetállósági minősítés fenntartásának kiegészítésére, javítására szolgáló intézkedések, illetve az állapotfüggő felújítások cserék és átalakítások programja, valamint az üzemeltető szervezet képességét/tudását biztosító programok. Ez azt jelenti, hogy az engedélymegújítás szabályozása szoros kapcsolatot létesít a meghosszabbított üzemidő engedélyezésének specifikus területei és más erőművi tevékenységi területek között, mint például a tudásmenedzsment, a technikai eszközök avulásából származó problémák megoldása, stb.

Az engedélymegújításra vonatkozó hivatalos kérelmet egy évvel az engedély lejártá előtt (az 1. blokk esetében 2011 végére) kell elkészíteni és a hatóságnak benyújtani. A kérelemben értékelni kell a program szerinti hároméves üzemeltetés tapasztalatait. Be kell mutatni, hogy a program hatékony, jól szolgálja a biztonságos üzemeltetést, valamint azt is, hogy az üzemidő hosszabbítás biztonságának igazolására készült indoklások/számítások a három év tapasztalatai (természetesen a megelőző 26 év tapasztalataival együtt) alapján megállapítható öregedési trendek szerint érvényesek maradnak.

A magyar szabályozási keret többszörösen redundánsnak tűnhet. A Végleges Biztonsági Jelentés és annak évenkénti aktualizálása, a tízévenkénti Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat, valamint az engedélymegújítás közötti kapcsolat bár redundanciákat mutat, de valójában az egymást kiegészítő eszközei a biztonság hatósági ellenőrzésének.

Az évenként aktualizált VBJ-ben szemléltetni kell az erőmű biztonságát és az aktuális engedélyezési alapnak való megfelelést, miközben az erőmű biztonságára ható hosszú távú tendenciákat (öregedés, tapasztalatok visszacsatolása, új tudományos bizonyítások, új követelmények) tízévente értékelni kell az IBF keretében. A paksi atomerőműben már az első Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat (1995-1999) eredményeképpen egy átfogó biztonságnövelő program fogalmazódott meg. A második IBF 2007-ben történt, és nagyrészt az erőmű rendszer-elemei öregedésének vizsgálatára és értékelésére irányult. A soron következő IBF-ek az engedélymegújítás megalapozásaként megfogalmazott, az öregedés trendjére vonatkozó előrejelzéseket is érvényesíteni fogják.

Bár az engedélymegújítás a hosszú élettartamú, passzív szerkezetek és rendszerelemek öregedésére és öregedéskezelésére összpontosít, el kell végezni az aktív rendszerek és berendezések rendeltetés szerinti biztonsági funkciójának fenntartására szolgáló programok felülvizsgálatát, hatékonyságuk értékelését is az engedélymegújításra vonatkozó kérelemben.

Az öregedési folyamatok elemzéséből származó időkorlátokra s az öregedéskezelésre vonatkozó eredményeket, amelyek az engedélymegújítás megalapozása során keletkeztek, szükségképpen dokumentálni kell a Végleges Biztonsági Jelentésben.

## AZ ENGEDÉLY-MEGÚJÍTÁS FŐ FELADATAI

Az üzemidő hosszabbítás előkészítésének legfontosabb feladatai közvetlenül az engedély megújításával vannak kapcsolatban. Ezek a következők:

- A. az erőmű állapotának, az erőművi öregedéskezelési programok megfelelőségének felülvizsgálata és bemutatása;
- B. az üzemidő korlátot meghatározó öregedés-elemzések (KIBE) felülvizsgálata, érvényesítése és átdolgozása;
- C. hosszú távú üzemeltetést szolgáló program kidolgozása.

A fenti első két feladat az engedélymegújításhoz szükséges ismert alapfeladatok, hasonlóan, mint a már hivatkozott USA gyakorlatban. Ezen a területen a nemzetközi tapasztalatok is felhasználásra kerültek, lásd a [4] hivatkozást. Mindezek ellenére itt is vannak figyelemreméltó műszaki sajátosságok, amelyeket az alábbiakban ismertetünk és bemutatjuk az üzemidő hosszabbítás programjának legfőbb elemeit is.

## AZ ÖREGEDÉSKEZELÉS FELÜLVIZSGÁLATA

### Az öregedéskezelés terjedelme

Az üzemeltetési engedélyt a biztonság mérlegelése alapján újítják meg, tehát az eljárás kiterjed az összes olyan biztonsági osztályba sorolt szerkezetre, rendszerre és rendszerelemre (RRE), amelyeknek a teljes üzemidő során rendeltetés szerinti biztonsági funkciót kell ellátniuk. Azokat a nem biztonsági funkciójú rendszer-elemeket is be kell vonni a mérlegelés körébe, amelyek meghibásodása akadályozhatja/befolyásolhatja a biztonsági funkciókat.

Az öregedéskezelés hatálya alá tartozó szerkezetek, rendszer-elemek körének meghatározása két lépésből áll. Először a rendszerek, rendszer-elemek fent meghatározott kell kijelölni, majd ebből a teljes terjedelemből kell a passzív, hosszú élettartamú szerkezeteket, rendszer-elemeket kiválasztani, s ezek tartoznak az öregedéskezelés körébe, terjedelmébe.



Ugyanakkor – a bevezetőben megfogalmazott teljesség elve szerint – az öregedéskezelési terjedelemben nem tartozó rendszerek és rendszerelemek megkövetelt műszaki állapotát és biztonsági funkcióját is fenn kell tartani valamilyen programmal, ahogy azt az 1. ábrán szemléltettük.

### **A vver-440/213 típusal kapcsolatos problémák**

Az öregedéskezelés terjedelmének fent vázolt meghatározása a rendszerek, rendszerelemek rendkívül tág körét jelöli ki. A paksi atomerőmű esetében az 1., 3. biztonsági osztályba tartozó rendszerlemek száma meghaladja a százazretet. A passzív, hosszú élettartamú szerkezetek és rendszerlemek száma is nagyon nagy. Mindez a hathurkos konstrukcióval és a VVER-440/213 típus organikus-evolúciós kifejlesztésével magyarázható. A biztonságot érintő elemek nagy számának másik oka a determinisztikus besorolási mód, amely a zónaolvasási gyakorlatokra látszólag minimális hatással lévő rendszerlemeket is nagy számban kötelezően biztonsági osztályba sorolja.

Az aktív és rövid élettartamú rendszerek kiszűrése után mintegy 35000 gépészeti, 6500 villamos és 2000 tartószerkezeti rendszerlem marad a terjedelemben. Ez a terjedelem rendkívül megnövelte volna az erőmű öregedéskezeléssel kapcsolatos teendőit, valamint az engedélymegújítás szempontjából szükséges felülvizsgálatok nagyságát. Ezért alkalmas módszereket kellett találni az ilyen nagy tételszám ésszerű kezeléséhez. Ilyen például:

- Az öregedéskezelés strukturált szervezése;
- Az öregedéskezelés szervezéséhez és a szerkezetek, rendszerlemek állapotával kapcsolatos információ kezeléséhez hatékony információtechnológiai eszközök alkalmazása.

Az öregedéskezelés és az engedélymegújítás támogatásához kifejlesztett információtechnológiai rendszer bemutatását lásd a [5] irodalomban. Itt az öregedéskezelési strukturálását, a programok strukturált szervezését mutatjuk be.

### **Az öregedéskezelés STRUKTÚRÁLT szervezése**

Itt a differenciált, fokozatos megközelítést kell alkalmazni az adott szerkezet vagy rendszerlem biztonsági jelentősége, valamint az adott öregedéskezelési mechanizmusnak az erőmű élettartamát korlátozó jellegének jelentősége szerint. Ennek megfelelően a szerkezeteket és rendszerlemeket két kategóriába osztottuk fel:

- összetett tulajdonságokkal és öregedési mechanizmusokkal rendelkező, a biztonság szempontjából nagyon fontos szerkezetek és rendszerlemek;
- öregedéskezelési csoportok (commodities), azaz olyan elemek, mint pl. csővezetékek, csőelemek (könyökök, T-idomok), szelepek, hőcserélők.

A nagyon fontos szerkezeteknek és rendszerlemeknek (mint például a reaktortartály a belső berendezé-

sekkel együtt, a fő keringtető hurok elemei), azaz az 1. biztonsági osztályba sorolt (ABOS1) és néhány 2. biztonsági osztályba sorolt (ABOS2) szerkezetnek és rendszerlemnek speciális öregedéskezelési programokkal kell rendelkezniük. ezek lényegében több, egyenként egy-egy degradációs mechanizmust vagy kritikus helyet kezelő programból állnak.

Az öregedéskezelési csoportokat típusonként, biztonsági osztályonként, azonos tervezési jellemzők szerint, anyaguk és üzemeltetési körülményeik szerint, valamint a domináns öregedési mechanizmus alapján lehet kialakítani. Mindegyik öregedéskezelési csoportra vonatkozóan speciális öregedéskezelési programot lehet végrehajtani.

A gépészeti rendszerlemeket tekintve mintegy száz öregedéskezelési csoportot határoztunk meg. A tartószerkezetek öregedéskezelési csoportjainak száma meghaladja a huszonötöt.

Az öregedéskezelési programokat hierarchikusan rendszerét az építészeti szerkezetek (tartószerkezetek) és szerkezeti elemek (például állványok, szupportok) példájával lehet szemléltetni.

A VVER-440/213 architektúrája és tartószerkezeti kialakítása nagyon különbözik a nyomottvízes reaktorok szokásos felépítésétől. A paksi atomerőmű esetében gyakorlatilag az erőműben található összes épület az öregedéskezelési terjedelem része. Ezen építmények a szerkezeti kialakítás, elrendezés, az elemek gyártása és összeállítása, az anyagösszetétel és a környezettel való érintkezés szempontjából is összetett és heterogén szerkezetek. Megállapítható volt, hogy a paksi atomerőmű esetében nem lehet az USA gyakorlatából ismert GALL Jelentésben [6] leírt öregedéskezelési programok alkalmazásával az épületek öregedéskezelését elintézni, hiszen ott az építészeti szerkezeteknek mindössze kilenc csoportja, a szerkezeti rendszerlemeknek pedig hét csoportja van, és tíz öregedéskezelési program fedi le a teljes terjedelmet. A paksi atomerőműben az építészeti szerkezetek és szerkezeti elemek nagy száma és sokfélesége miatt az öregedéskezelési programokat hierarchikus rendszerként kellett kialakítani. Az „A” típusú programokat vagy konkrét szerkezetekre (alapozás, földemek, a reaktor alátámasztó szerkezetek, acélszerkezetek, előgyártott panelek, téglafalak, ajtók és zsilipek, kábel- és csőalátámasztások, bevonatok, kábel- és csőátvezetések, tűzvédelmi szerkezetek, szekrények alátámasztó szerkezetei, tömitések és szigetelések) vagy pedig konkrét folyamatokra (épületmozgások, főépület süllyedés), illetve környezeti körülményekre (magas hőmérséklet, borsavas környezet, acél és vasbeton víz alatt) dolgoztuk ki. A felsoroltak mellett speciális „A” típusú program vonatkozik a konténment tömörségének ellenőrzése.

A meghatározott biztonsági funkciókkal rendelkező épületek több, a fentiekben felsorolt elemből állhatnak (alapozás, vasbeton vagy acélszerkezet, stb.), illetve több folyamat is okozhatja degradációjukat. Így az épületek,

mint komplex rendszerek öregedéskezelése is összetett, több „A” típusú program integrálásának eredményeként áll elő. Ezek a „B” típusú programok, amelyek az adott épület komplexitásának megfelelő „A” típusú programok integrálásával alakíthatók ki. A szerkezet-típusokra vagy mechanizmusokra (öregedéskezelési csoportokra) vonatkozó „A” típusú programok felhasználásával harminc „B” típusú program készült, amelyek lefedik az erőmű összes épületét.

Nyilvánvaló, hogy az öregedéskezelési programok hierarchikus struktúrája erőmű specifikus. A példa mutatja, hogy nem lehet egyszerűen másolni akár a legjobb nemzetközi gyakorlatot sem a VVER-440/213 erőmű típusra, még akkor sem, ha az öregedési mechanizmusok hasonlóak, továbbá azok kezelése is lényegében hasonló, a nemzetközi gyakorlatnak megfelelő elvek szerint kidolgozott programokkal történik [3], [5].

## AZ ÖREGEDÉSI FOLYAMATOK ELEMZÉSE

Egyes öregedési folyamatok elemzését ab’ovo a tervező elvégzi, és igazolja, hogy a tervezett üzemidő alatt a rendszerem integritása, funkciója megmarad. Ennek tipikus példája az erózióra-korrózióra, a fáradásra vagy a neutron-besugárzás által kiváltott ridegedésre vonatkozó elemzések. Ezeket az elemzéseket a tervező a körülményekre és a terhekre, stresszorokra tett feltételezések alapján végzi el. Az elemzésekből megállapított élettartam-korlátok, illetve az elemzések maguk is érvényüket veszítik, illetve veszíthetik, ha az üzemidőt a tervezettnél meghosszabbítják és/vagy a körülmények, a stresszorok jellemzői és gyakorisága megváltozik. Az üzemidő hosszabbítás megalapozása keretében el kell végezni ezen elemzések felülvizsgálatát és igazolni kell megállapításait, következtetéseit érvényességét a meghosszabbított üzemidőt figyelembe véve. A felülvizsgálat kimenetele többféle lehet:

- elképzelhető, hogy az adott elemzés és megállapításai érvényesek a meghosszabbított üzemidő esetén is (például azért, mert ciklusszám a meghosszabbított üzemidő alatt sem éri el a megengedett értéket);
- a tervező elemzéseit korrigálni kell és lehet, mivel a tapasztalatok alapján a tényleges üzemi stresszorok kedvező irányban eltérnek a tervezéskor feltételezettől;
- egyes esetekben egy korszerű módszerrel elvégzett részletes elemzéssel lehet kiváltani az egykori, esetenként túl konzervatív elemzéseket,
- egy célzott öregedéskezelési programmal vagy más intézkedéssel (például a berendezés cseréjével) kell a megfelelőséget biztosítani.

A fenti feladat – a többi VVER-440/213 erőműhöz hasonlóan – nehezen végrehajtható a paksi atomerőmű esetében a tervezési alapra vonatkozó információ és a leszállított tervezési dokumentáció hiányosságai miatt. Az utólagos erőfeszítések ellenére az eredeti tervezési feltételezések, input adatok részben ismeretlenek szá-

munkra. Gyakran csak az elemzések végleges eredményei ismertek, néhány esetben az elemzések beláthatóan elavultak. A leglényegesebb probléma azonban az, hogy az elemzések alapját képező előírások is megváltoztak a tervezés óta eltelt csaknem harminc év alatt. E problémák miatt az elemzéseket vagy korszerű módszerekkel végzett számításokkal ellenőrizni kell, vagy sok esetben ezeket az öregedés-elemzéseket újból végre kell hajtani az aktuális követelményeknek és útmutatóknak megfelelően.

A fentiekben vázolt munkát a [7] dolgozat taglalja, itt a munka fontos lépéseit mutatjuk be.

Az első teendő azon szerkezetek és rendszeremek meghatározása, amelyekre fáradás-elemzést kell végezni. Az elemzések körének a paksi atomerőmű esetében is le kell fedni a releváns területeket, mint például a fáradás, ridegedés, anyagtulajdonság változások. A számítási tételek tekintetében azonban itt is szembesülni kellett azzal, hogy egyfelől a konstrukció sajátosságai miatt, másfelől a magyar szabályozás miatt az elemzések száma lényegesen nagyobb, mint az atomerőművek legtöbbjében. A fáradás-elemzést kell végezni az 1. és 2. biztonsági osztályba (ABOS 1 és 2) sorolt csővezetékerekre és komponensekre, mint a reaktortartály, a gőzfejlesztők, a térfogat-kiegyenlítő tartály, a fő keringtető szivattyú és a főelzáró tolózár házak, egyéb 1. és 2. biztonsági osztályba sorolt csővezetékek, tartályok, szivattyúk, hőcserélők és szelepek. Figyelembe véve a hőretegződés jelenségeket is. A reaktortartályt illetően a nyomás alatti hősokk (Pressurised Thermal Shock – PTS) elemzésen kívül ellenőrizni kell a biztonságos üzemeltetés korlátait és feltételeit is. Specifikus elemzések például az alábbiak:

- A reaktortartály és a gőzfejlesztők belső szerkezetei áramlás okozta rezgésének nagyciklusú fáradás elemzése;
- 1. és 2. biztonsági osztályba sorolt (ABOS 1 és 2) rendszeremek termikus öregedés-elemzése;
- Fáradás-elemzés biztonsági funkciót ellátó darukra;
- Élettartam korlát elemzés gőzfejlesztő csövek anyagtulajdonság változására tekintettel;
- Élettartamkorlát-elemzés a biológiai védelemként szolgáló nehéz beton szerkezetek anyagtulajdonság változására tekintettel;
- A konténment fáradás elemzése integrális tömörség vizsgálatok nyomás-terheléseire;
- a 2. és 3. biztonsági osztályba sorolt villamos és irányítástechnikai rendszeremek környezetállítási minősítésének érvényesítése a meghosszabbított üzemidőre;
- A Roncsolásmentes vizsgálatok során észlelt hibák repedésterjedés-elemzése.

Specifikus követelmény annak ellenőrzése, hogy az 50 év üzemeltetésen túl van-e további 10 év tartalék a szerkezetben. Az elemzések felülvizsgálata, érvényesítése és átdolgozása lényegében magában foglalja az adott szerkezetek, rendszeremek meglévő szilárdsági elemzéseinek ellenőrzését is.

A fentiekből látható, hogy a magyarországi szabályozás által megkövetelt elemzések terjedelme igen jelentős, a nemzetközi összehasonlítást tekintve meghaladja a máshol szokásos terjedelmet.

A következő lépés a terhek és üzemeltetési körülmények felülvizsgálata, illetve újbóli meghatározása. Erre mindenképp szükség van, mivel ma a feltételezett kezdeti események, tranziens- és baleseti scenáriók körét – a szabályozás változása miatt – a tervezésnél figyelembe vettekől lényegesen eltérően definiáljuk. A terhelési ciklusokra vonatkozó de facto üzemi ismeretek is eltérhetnek a tervezéskor figyelembe vettekől. Következésképp, új terhelés-katalógust kellett összeállítani a meglévő tervezési információ, a Végleges Biztonsági Jelentéshez készített üzemzavar-elemzések eredményei és az üzemeltetési történet alapján és a meghosszabbított üzemidő figyelembevételével.

A magyarországi szabályozás a mindig kor színvonalának megfelelő módszerek, kódok és szabványok alkalmazását követeli meg a tárgyi öregedés-elemzések végrehajtásánál. Esetünkben az ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III 2001. évi kiadását (a továbbiakban ASME BPVC III) tekintjük az elemzések és a szilárdsági ellenőrző számítások alapjának. Az ASME kód általános alkalmazása eldöntött kérdés a paksi atomerőműben. Megtörtént az üzem közbeni vizsgálati programok átfogó felülvizsgálata és előkészítették ezek ASME BPVC Section XI. kódnak való megfeleltetését.

A szabvány és módszertan meghatározása nagy körültekintést igényelt, hiszen igazolni kellett azt is, hogy milyen feltételek és megszorítások esetén korrekt az ASME BPVC III alkalmazása a szovjet szabványok szerint tervezett, gyártott VVER-440/213 típusú blokkokra. Részletes módszertani és kritérium dokumentum készült a számításokhoz, amely definiálja az ASME BPVC III rutinszerű használat mellett a specifikus számítási utasításokat is, amelyek az ASME BPVC III rutinszerű alkalmazásától eltérnek vagy a speciális szabályozási környezet, vagy a VVER-440/213 blokkok műszaki sajátosságai miatt. Az alábbiakban néhány fontos sajátosságot bemutatunk.

Az ASME BPVC III alkalmazását illetően lényeges kérdés az anyagtulajdonságok meghatározása. Itt a gyártó ország akkor alkalmazott ipari szabványait, a tervezők és a gyártó műszaki specifikációit, valamint az anyagokra és a szerelésre vonatkozó ténylegesen alkalmazott magyar hatósági normákat kell figyelembe venni. Akkor, ha az anyagtulajdonságok nem azonosíthatók a leszállított dokumentációból, az orosz PNAE G-7-002-86 [8] szabványt kell alkalmazni.

A VVER-440/213 berendezések anyaga – a fáradás elemzések körébe tartozó rendszerelemeket tekintve – lehet szénacél, gyengén ötvözött acél (ST20, 22K, 15H2MFA, 18H2MFA) és rozsdamentes acél (08H18N10T, 08H18N12T). Az elemzés alapját a fáradás görbék képezik. Itt az orosz PNAE szabvány által előírt anyag specifikus fáradási görbéket kell alkalmaz-

ni, s ennek megalapozásához elemeztük a fáradás görbék meghatározásának empirikus és elméleti hátterét.

A ridegtörés elemzését az előírások szerint el kell végezni az összes kritikus berendezésre, illetve keresztmetszetre. A már működő szivattyúk és szelepek esetében azonban az ütővizsgálatok eredményei az adott anyagokra nem állnak rendelkezésre. Ebben az esetben az elemzést a VERLIFE Projekt keretében kidolgozott módszer és eljárásrend szerint kell végrehajtani [9].

A reaktortartály üzemeltetésének maximális időtartamát figyelembe véve a neutron besugárzás miatti károsodást, a termikus öregedést és a reaktortartály anyagainak szívósságát csökkentő kisciklusú fáradást kell elemezni. Az átmeneti hőmérséklet öregedés miatti változása kiszámítható mind a PNAE kód, mind pedig a VERLIFE szerint metodika szerint. A tervező és magyar szakértők által készített stúdiumok szerint a nyomás alatti hősokek (PTS) a legkritikusabb élettartam korlátozó esemény a reaktortartály esetében. A neutron besugárzás okozta hatás az aktív zóna közelében domináns. A reaktortartálynak ez a része a legérzékenyebb a rideg repedés kialakulás és a repedés-növekedés szempontjából. A reaktortartály többi részén (például a csonkok környékén) a feszültség jóval nagyobb lehet, és a neutron fluencia pedig jóval alacsonyabb, mint az övzónában. Ilyenek a csonkok és azok környezete, a támasztó peremek környezete és a tartály 3/5 varrata. Az elvégzett tanulmányok szerint a 8/9 varrat nem kritikus a PTS szempontjából, azonban mégis szerepel az elemzésben. A reaktor főosztósík és környezete nincs kitéve magas neutronsugárzásnak, következésképpen, nem kritikus a PTS szempontjából. Ugyanez érvényes a reaktortartály fedélre és az azon lévő csonkokra is. A reaktortartály ezen alkatrészei nincsenek kitéve magas neutronsugárzásnak, és a belső nyomásból származó feszültségek lényegesen alacsonyabbak, mint a csonk zónájában. A PTS elemzés módszertanát az erre a célra készült magyarországi hatósági útmutatók tartalmazzák.

A reaktortartály biztonságát tekintve az üzemidő hosszabbítás programja tartalmazza az újabb próbatetek vizsgálatát, s a neutron besugárzás által okozott ridegödést befolyásoló intézkedések (kis kiszökésű zóna) várható hatásainak vizsgálatát.

A fáradás különböző mértékben van hatással a reaktortartály komponenseire. A tervező és a gyártó alap kifáradás elemzéseket hajtott végre a reaktortartály kritikus elemeire. Az engedélymegújítás előkészítése keretében ezeket az elemzéseket megújították a tervezési alap megváltozásának figyelembevételével.

A reaktortartály kifáradás szempontjából kritikus helyei az szabályzó és biztonságvédelmi csonkok belső csöveinek hegesztési varratai.

Az öregedés-elemzések keretében újraértékelték a reaktortartály anyagok kritikus ridegtörési hőmérsékletének értékét ( $T_k$ ) az öregedett állapotra. A validált számított neutron fluencia-értéket vették figyelembe a jellegzetes pontokban; az alapanyagban és az 5/6 varrat

anyagában, a reaktor hatvanadik és ötvenedik üzemévére vonatkozóan. A PTS számítások eredményei megerősítik az összes blokkra vonatkozóan az 50 éves üzemeltetés lehetőségét az 5/6 varratok utólagos hőkezelése nélkül. Az 1. blokki reaktortartály rendelkezik a legrövidebb élettartammal, de ebben az esetben sincs szükség semmilyen intézkedésre.

## AZ ÜZEMIDŐ HOSSZABBÍTÁS PROGRAMJA

### A program tartalma

Az üzemidő hosszabbítás programjának kidolgozása, végrehajtása és értékelése fontos és sajátos eleme a magyar gyakorlatnak. A program tartalmát a szabályozás írja elő, mivel annak benyújtása és hatósági jóváhagyása az újraengedélyezési folyamat első lépése. A programban megfogalmazott intézkedések forrása az öregedéskezelési programok, az élettartam-korlátokat meghatározó öregedés-elemzések, valamint az üzemeltető egyéb, az erőmű megkövetelt állapota fenntartását szolgáló programjainak felülvizsgálata és hatékonyságának értékelése, amelyből az erőművi gyakorlat módosítására vonatkozó intézkedések levezethetők. A program részei az alábbiak:

- a) a megfelelőnek minősített erőművi programok folytatása;
- b) új erőművi programok kidolgozása vagy a meglévők módosítása, azok bevezetése;
- c) az üzemeltetési engedély megújításához előírt feladatok végrehajtása, feltételek teljesítése.

A programba foglalt intézkedéseket be kell építeni az erőmű átfogó élettartam-gazdálkodási programjába, amely kiterjed a nem biztonsági osztályba sorolt rendszerre, és biztosítja az összes erőforrást és feltételt az üzemidő hosszabbításhoz és az üzemeltető működéséhez.

Az üzemidő hosszabbítás programját olyan stratégiai programnak kell tekinteni, amely meghatározza az üzemeltető cég összes tevékenységi területét, pl. a humán erőforrás menedzsmentet, tudásmenedzsmentet, valamint szemlélteti az erőmű elkötelezettségét.

A program végrehajtását három év után értékelni kell, és az eredményeket össze kell foglalni az engedély-kérelemben.

Annak ellenére, hogy az üzemidő hosszabbítás programja társasági szintű program, de az engedélyezési folyamatban betöltött szerepe miatt nem tartalmaz minden, az erőmű és tulajdonosai számára fontos intézkedést és szempontot. Ilyenek az üzemidő hosszabbítás üzleti értékelése, a műszaki, engedélyezési és gazdasági kockázatok értékelése, valamint a lakossági elfogadáshoz kapcsolódó kockázatok. Ezek a megvalósíthatósági tanulmány részét képezték. Az immár csaknem egy évtizede folyó szisztematikus előkészítő munka eredményeképpen az üzemidő hosszabbítás műszaki, engedélyezési és üzleti kockázata elhanyagolható. A meghosszabbított

üzemeltetés széles körű lakossági támogatást élvez, és 2005-ben a magyar Országgyűlés is egyetértéssel tudomásul vette a paksi atomerőmű üzemidő hosszabbítását.

### Szinergiák

A programban meghatározott intézkedések kapcsolatban vannak az üzemeltető szinte minden más tevékenységével. A tevékenységek közötti szinergiákat ki lehet használni, amelyre az alábbiakban néhány példát hozunk.

A paksi atomerőműben átfogó biztonságnövelő programot hajtottak végre, s ennek keretében jelentős átalakítások történtek. Ennek köszönhetően a zónasérülés gyakorisága a ~10-5/év szintre csökkent. Itt nyilvánvaló pozitív kapcsolat létezik: a biztonságnövelés nélkülözhetetlen előfeltétele volt az üzemidő hosszabbításnak, továbbá a biztonság és az üzemeltető biztonság iránti elkötelezettsége a lakossági elfogadottság legfontosabb feltétele. A biztonságnövelés közvetlen vagy implicit műszaki előnnyel járt: A biztonságnövelő átalakítások miatt egyes rendszereket vagy azok létfontosságú részeit felújították, azok újszerű állapotba kerültek. Néhány esetben a biztonságnövelő intézkedések közvetlen hatással vannak az élettartamot korlátozó folyamatokra. A térfogat-kiegyenlítőn telepített új nyomásszabályozó szelepek biztosítják a reaktor túlnyomás elleni védelmének lehetőségét hideg állapotban, azaz megszüntetik a reaktortartály ridegtörésének veszélyét.

A teljesítménynövelés többszörösen összefügg az üzemidő hosszabbítással. A teljesítmény növelését az üzemanyag-kazetták modernizálásával érték el, ezért normálüzemben csak a hűtővíz entalpiája nőtt a reaktor kimeneténél, s csak néhány tranzienst folyamatban alakulhatnak ki magasabb paraméterek, amit egyes elemzésekben figyelembe kell venni. Az elemzések szerint ezek a változások nem okozhatják a kritikus rendszer-elemek élettartamának csökkenését. Néhány, viszonylag egyszerű átalakítás is történt, például a primerköri nyomásszabályozó rendszer és a zónamonиторozó rendszer modernizációja, a fő keringtető szivattyú járókerekek cseréje egyes blokkokon. Ezek következtében üzemi nyomástartás egyenletesebb lett, s megoldódott a szivattyú járókerekek repedését okozó öregedési probléma is. Nyilvánvaló, hogy a teljesítménynövelés fokozza a versenyképességet és hatással van a hosszú távú üzemeltetés gazdaságosságára.

A biztonságnövelő célzatúak mellett történtek az üzemeltetés megbízhatóságának javítására és az energiatermelés költséghatékonyságára irányuló rekonstrukciók is, mint a turbina kondenzátorok cseréje, a nagynyomású előmelegítők átalakítása, stb. A turbina kondenzátor cseréje lényeges hatással van a gőzfejlesztők élettartamára. A VVER-440/213 típusú blokkok esetében a gőzfejlesztők gyakorlatilag ne cserélhetők, ezért a gőzfejlesztők öregedése korlátozza az erőmű élettartamát. A domináns öregedési mechanizmus a gőzfejlesztő hőcserélő cső fe-

szültségkorróziója. A rozsdamentes acél csövezésű új kondenzátorok tömörök, lehetővé teszik a magas pH értékű vízüzem bevezetését a szekunderkörben, csökken a szennyeződések bekerülése a kondenzátor hűtővízből, ami jobb üzemeltetési feltételeket biztosít a tápvízrendszer komponensei, valamint a gőzfejlesztők számára, s ezt a gőzfejlesztők 100%-os ellenőrzése igazolja. Az értékelések szerint a gőzfejlesztőket 50 évig üzemeltetni lehet.

## KÖVETKEZTETÉSEK

Az elmúlt évtizedben átfogó szabályozási rendszer és az atomerőmű megkövetelt műszaki állapota fenntartására egy teljes körű erőművi rendszer alakult ki a paksi atomerőmű hosszú távú, biztonságos üzemeltetésének megvalósítására. Mind a szabályozási rendszer, mind pedig az üzemidő hosszabbítását szolgáló erőművi program a jelen dolgozatban vázolt elveken alapul. Ezáltal – a biztonsági relevancia és a termelésre gyakorolt hatása szerint differenciált módon – minden rendszer és rendszerelem valamilyen meghatározott módon felügyelt és megoldott a műszaki állapotának fenntartása, és az üzemidő hosszabbítás programja szerint a hosszú távú üzemeltetés összes feltétele biztosított, összhangban teljesség elvével.

Az üzemeltetési engedély megújításának előkészítése és megalapozása a nemzetközi gyakorlat és a kor színvonalának megfelelő módszerek kreatív alkalmazását követelték meg, figyelembe véve a tervezési jellemzőket, a nemzeti szabályozást és a paksi atomerőműben kialakult gyakorlatot.

A fent bemutatott módszerek, programok, a hatósági jóváhagyás és ellenőrzés alkalmazása biztosítja a paksi atomerőmű lehető leghosszabb ideig tartó biztonságos és gazdaságilag ésszerű, magas teljesítményen történő üzemeltetését.

## SUMMARY

A comprehensive regulatory framework and plant system have been developed for ensuring the safety of long-term operation of WWER-440/213 type plant at Paks. Both the regulatory framework and the plant programme are based on the principles outlined in the paper. Applying these principles a gapless system could be established which ensures that any SSCs will be covered by some of the plant programmes, and within the frame of Long-term Operation Programme all conditions of proper operation will be ensured in line with basic criterion of completeness of plant practice.

Best international practice and state-of-the-art methodologies have been applied while performing the particular tasks for preparation and justification of long-term operation and license renewal. However, as it has

been demonstrated, any good examples and experiences should be adapted in creative way taking into account the design features, national regulations, and existing plant practice.

Applying methods, programmes, regulatory control described above, the strategy of Paks NPP to operate safely as long as possible and economically reasonable at higher power level will be ensured.

## HIVATKOZÁSOK

- [1] KATONA T. J., JÁNOSINÉ BÍRÓ A., RÁTKAI S. AND FERENCZI Z. (2005). „Key Elements of the Ageing Management of the WWER-440/213 type Nuclear Power Plants” 18<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), Beijing, China, August 7-12, 2005, paper D02-4, [http://www.iasmirt.org/iasmirt-2/SMiRT18/D02\\_4.pdf](http://www.iasmirt.org/iasmirt-2/SMiRT18/D02_4.pdf)
- [2] KATONA T., RÁTKAI S., Key Elements of Long Term Operation of WWER-440/213 Units at Paks NPP, paper IAEA-CN-155-003, Second International Symposium on Nuclear Power Plant Life Management, Shanghai, China 15-18 October 2007, IAEA, Vienna, paper IAEA-CN-155-018
- [3] Országos Atomenergia Hivatal, 4.12. Öregedéskezelés az atomerőművek üzemeltetése során, 2007. március, [http://www.haea.gov.hu/web/v2/portal.nsf/letoltes\\_hu/](http://www.haea.gov.hu/web/v2/portal.nsf/letoltes_hu/)
- [4] Safety Aspects of Long Term Operation of Water Moderated Reactors, IAEA-EBP-SALTO, International Atomic Energy Agency, Vienna, July 2007
- [5] KATONA T., JÁNOSINÉ BÍRÓ Á., CZIBOLYA L., RÁTKAI S.: Aging Management Database at the VVER-440/213 Units of Paks NPP, 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), Beijing, China, August 7-12, 2005, paper Post Conference Seminar 12
- [6] Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, NUREG-1801, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001, July 2001
- [7] KATONA T.J., RÁTKAI S., PAMMER Z., Reconstitution of Time-limited Ageing Analyses for Justification of Long-Term Operation of Paks NPP, in: 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 19), Toronto, Canada, 12 August 2007, paper D02/2-1
- [8] PNAE G-7-002-86: Nukleáris létesítmények berendezéseinek és csövezetékeinek szilárdsági számítási normái, 1990. (orosz nyelven), Moszkva, ATOMIZDAT, 1989
- [9] VERLIFE Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs. 2003, EURATOM Fifth Framework Programme on lifetime assessment of components and piping in VVER NPPs, Final Report, EU Contract No.:FIKS-CT-2001-20198

# TÁRSASHÁZAK ENERGIA-HATÉKONY FELÚJÍTÁSI LEHETŐSÉGEI (ECOLISH PROJEKT)

## POSSIBILITIES OF ENERGY EFFICIENT RENEWING OF RESIDENTIAL BUILDINGS (ECOLISH PROJECT)

Dr. Magyar Zoltán\*, Baumann Mihály\*\*

### ÖSSZEFOGLALÁS

Az Európai Unióban az épületek energiaigényének kielégítésére 9500 PJ energiát használunk fel, ami a teljes energiafelhasználás 40-42%-át teszi ki. Az épületek energiafelhasználásának csökkentésére különböző uniós vállalások [1], direktívák [2] és hazai rendeletek [4], [5] készültek. Különösen nehéz a lakóépületek energiatakarékosságát népszerűsíteni olyan társadalmi rétegeknél, akik anyagi gondokkal küszködnek. Az épületeket a rossz minőségű hőszigetelés, az épületgépészeti rendszer elavultsága és a nem megfelelő belső légállapot jellemzi, amiből adódik a magas energiafogyasztás is.

Az ECOLISH (Energy Exploitation and Performance Contracting for Low Income and Social Housing) projekt [8], [9] az Európai Unió által finanszírozott, „Intelligens Európa” program támogatásával valósult meg. A projekt az Európai Unión belül különböző földrajzi fekvésű, de azonos szociális helyzetű, anyagilag szűkös körülmények között élők lakásainak energiacsökkentését támogatja. A program keretében bemutatásra kerültek a társasházak energia-hatékony felújítási lehetőségei. Az ECOLISH projekt a Pécsi Tudományegyetem Pollack Mihály Műszaki Kara, Pécsvárad Város Önkormányzata, valamint a Zengő Lakásszövetkezet együttes közreműködésével valósult meg.

### SUMMARY

The energy use of the residential buildings in EU is 9500 PJ, which is 40-42 % of the total energy consumption. To lower the energy consume, there are different EU action plans [1], directives [2], Hungarian decrees [4], [5], and standards [6], [7]. The social and low income housing have often high energy consumption in combination with poor indoor air quality and thermal comfort.

The ECOLISH (Energy Exploitation and Performance Contracting for Low Income and Social Housing) project [8], [9] was realized with the financial support of

\* Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki Kar, Épületgépészeti Tanszék, zmagyar@pmmk.pte.hu

\*\* Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki Kar, Épületgépészeti Tanszék

the European Union’s “Intelligent Europe” program. The project supports the energy savings in different regions of EU with the same low income level. The paper summarizes the main results of the project in Hungary; the energy efficient retrofitting possibilities of the apartments. The ECOLISH project was implemented with the cooperation of University of Pecs, Municipality of Pecsvarad, and the Zengo housing co-operative.

### BEVEZETÉS

Az ECOLISH projekt négy – földrajzilag, klíma és felhasználói szokások szempontjából különböző - helyszínen került megvalósításra:

- Heerlen, Hollandia;
- Ogre, Lettország;
- Pieria, Görögország;
- Pécsvárad, Magyarország.



1. ábra. ECOLISH helyszínek

Az ECOLISH projekt zárójelentéséből a továbbiakban a hazai vizsgálatokat, a pécsváradai tapasztalatokat, a mérési és számítási eredményeket mutatjuk be.

Pécsváradon a projektben kiválasztásra került házak (2. ábra) az 1960-70-es években épültek, alapterületük

65 m<sup>2</sup> és 105 m<sup>2</sup> közötti. A 107 lakásból álló épületcsoport a koruknak megfelelő műszaki előírás szerint épült, így a mai követelményeknek nem felelnek meg. A társasházak a magas energiafogyasztást jellemzően a nagy hőveszteségű épületszerkezetnek és az elavult fűtési rendszereknek köszönhetik.



2. ábra. A vizsgált lakóépületek

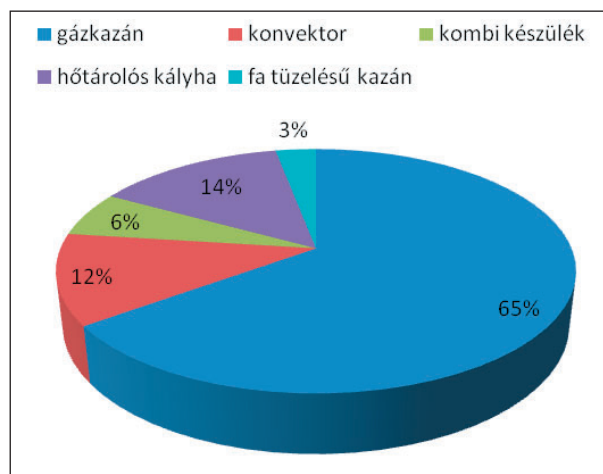
Kérdőívek és helyszíni bejárások alapján megvizsgáltuk a lakások épületfizikai állapotát, a fűtési rendszereket, a HMV termelést, a fűtési és a szellőztetési szokásokat, valamint a közüzemi energiafelhasználási számlákat. A tényleges energiafelhasználásokat összehasonlítottuk a számított adatokkal és meghatároztuk azokat a felújítási és energia-megtakarítási lehetőségeket, amelyeket - a megtérülési idő figyelembe vételével – javasolunk megvalósítani.

## A SZOCIÁLIS ÉS MŰSZAKI FELMÉRÉS EREDMÉNYEI

A lakások 99%-át a tulajdonosok lakják, a lakásokban átlagosan 2,2 fő él, a lakók összetétele minden korosztályt képvisel. Egy 96 kérdést tartalmazó felmérés során a lakók válaszoltak a lakáskörülményeket, a biztonságot, az üzemeltetést és karbantartást, a környezetvédelmet, a közlekedést, a szabadidős tevékenységet érintő kérdésekre.

Kiderült, hogy az itt élők 60%-a fizetésének 20%-át költi közüzemi számlákra. A megkérdezettek 86%-a kellemes helynek tartja a várost és lakóhelyét, nem kíván elköltözni innen. A legfenyegetőbb problémát a munkanélküliségben látják, ami a térséget is súlyosan érinti.

A lakások műszaki tartalmát érintő kérdőívől kiderült, hogy az ablakok 15%-át az utóbbi években kicserélték műanyagra, 70%-a pedig az eredeti kapcsolt gerébtokos fa ablak, melynek hőátbocsátási tényezője 2,5 W/(m<sup>2</sup>K). A 3. ábrán látható diagram a projektben szereplő lakásokban a megvalósított egyedi fűtések típusát és megoszlását szemlélteti.



3. ábra. A fűtési rendszer kialakítása a vizsgált lakásokban

A használati melegvizet a lakások 89%-ában elektromos bojlerrel állítják elő, klímakészülékkel összesen 5 lakás rendelkezik, termosztatikus radiátorszeleppel mindössze 7 lakás van ellátva.

A lakások lakóinak szokásait vizsgáló felmérés szerint a lakások háromnegyede nappal 20-23 °C-ra van felfűtve, éjszakára kb. ugyanennyien valamivel alacsonyabb hőmérsékletre állítják a fűtést. Összehasonlítva máshol végzett hasonló felmérésekkel, például Hollandiában éjjel egyáltalán nem fűtik a hálószobákat, Lettországból pedig minden helyiségben nappal is csak 18 °C-os belső léghőmérsékletet tartanak.

Város	Fűtési hőszükséglet	Fűtési igény hossza	Fűtés primer energia-igénye	HMV primer energia-igénye	Összesített energetikai jellemző (tényleges)	Összesített energetikai jellemző (követelmény)	Kategória
mértékegység	kW	h/a	kWh/(m <sup>2</sup> a)	kWh/(m <sup>2</sup> a)	kWh/(m <sup>2</sup> a)	kWh/(m <sup>2</sup> a)	
Pécsvárad	104	4632	169,7	64,8	234,5	133,9	F

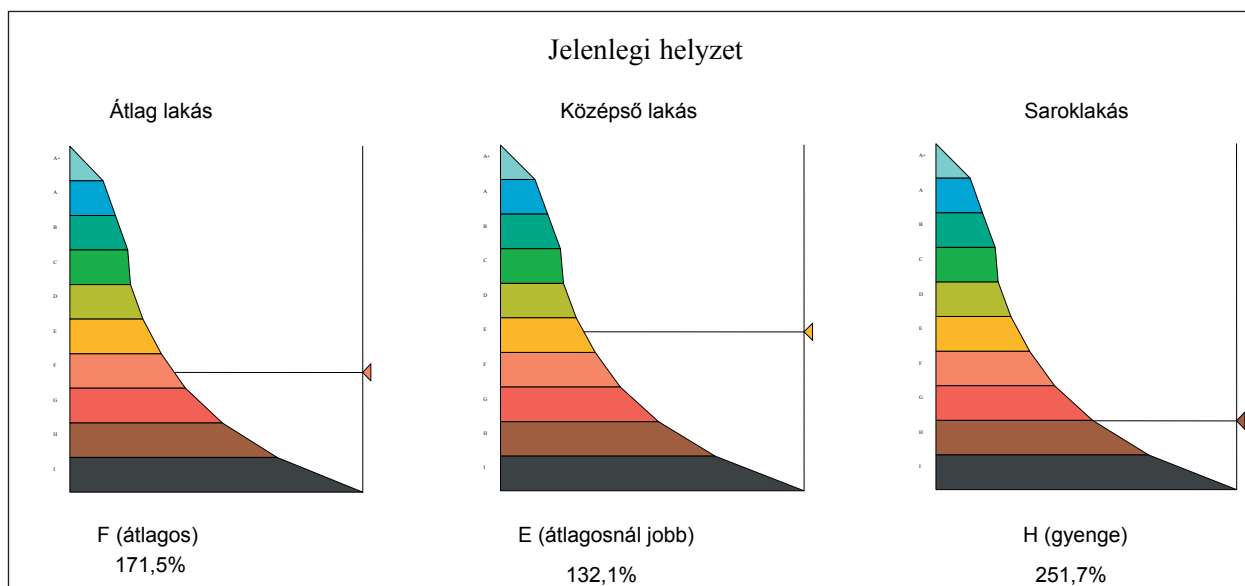
1. táblázat. Az egyik vizsgált épület tanúsítása

## AZ ENERGIAFELHASZNÁLÁS CSÖKKENTÉSI LEHETŐSÉGEI

### Jelenlegi helyzet

Az ECOLISH projekt során meghatároztuk - a 7/2006. TNM rendelet alapján – az egyes lakások, valamint a

teljes épület fűtésének és melegvíz-ellátásának éves primer energiaigényét, valamint az összesített energetikai jellemzőt. A 176/2008. Kormányrendelet szerint elvégeztük minden egyes lakás, valamint a teljes épület energetikai tanúsítását is. Az eredmények közül néhányat az 1. táblázat és a 4. ábra mutat.



4. ábra. A vizsgált épületen belül különböző lakások energiatanúsítványa jelenleg

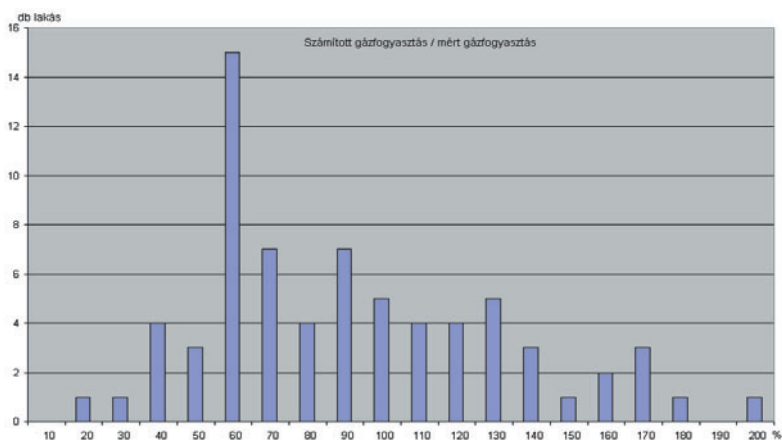
Látható, hogy az egyes lakások energetikai besorolása akár több kategóriával is eltérhet. Ennek oka elsősorban az, hogy a rossz épületszerkezetek befolyása nagyon jelentős.

A számítási eredményeket összehasonlítottuk a tényleges energiafogyasztással is. Azoknak a lakásoknak

az energiafogyasztását vizsgáltuk, amelyeknél gázzal fűtenek, és elektromos bojlerrel állítják elő a használati melegvizet. A 2. táblázatban összefoglaltuk egy átlagos lakás fűtési és HMV energiafelhasználását a tényleges, mért értékek alapján.

2. táblázat. Egy 70 m<sup>2</sup>-es lakás tényleges, mért energiafogyasztása

Város	Fűtésre használt gáz	Fűtés primer energiaigénye	Fajlagos gázfogyasztás	HMV primer energiaigénye	Összesített energetikai jellemző
mértékegység	m <sup>3</sup> /a	kWh/(m <sup>2</sup> a)	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> a)	kWh/(m <sup>2</sup> a)	kWh/(m <sup>2</sup> a)
Pécsvárad	1120	153	16	60	225



5. ábra. A vizsgált lakásokban a számított/mért gázfogyasztások aránya jelenleg

A lakások tényleges éves gázfogyasztása azonban nagy szórást mutatott, a legalacsonyabb érték 359 m<sup>3</sup>, a legmagasabb 2077 m<sup>3</sup> volt. Az 5. ábra azt mutatja, hogy a vizsgált lakások közül a pl. 15 lakásban a számított gázfogyasztás a tényleges érték 60%-a volt, ugyanakkor volt egy olyan lakás is, ahol éppen a kétszerese. A lakók között tehát számosan vannak, akik nem energiatudatosan üzemeltetik a lakást, ezért az elméleti értékeknél több a fogyasztásuk. Szerencsére azonban nagyobb azoknak a száma, ahol az energiatakarékosságra való törekvés a fogyasztási adatokban érzékelhető.



## FELÚJÍTÁSI, KORSZERŰSÍTÉSI LEHETŐSÉGEK

### Épületszerkezet hőszigetelése, nyílászárók cseréje

Meghatároztuk a meglévő szerkezetek hőátbocsátási tényezőjét és feltételeztük, hogy olyan korszerűsítést hajtunk végre, melynek következtében az épület szerkezetei éppen kielégítik a 7/2006. TNM rendeletben megengedett értékeket (3. táblázat).

3. táblázat. Épület szerkezeteinek hőátbocsátási tényezői

Szerkezet típusa	Jelenlegi helyzet	Követelmény érték	Felújítás után
mértékegység	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)
Külső téglafal 30/38	1,49/1,34	0,45	0,45
Ablak	2,5	1,6	1,6
Padlás földem	1,31	0,3	0,29
Pince földem	0,98	0,5	0,49

Az eredeti falszerkezetre (38-as és 30-as téglafal) 6 cm-es hőszigetelés felvitelét javasoljuk, ami a külső fal

hőátbocsátási tényezőjét  $U = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ -ra csökkenti. A kapcsolt gerébtokos ablakokat hőszigetelt üvegezésű ablakokra javasoljuk kicserélni. A padlásfödémre 11cm hőszigetelés kerül, így a szerkezet hőátbocsátási tényezője több mint negyedére csökken, a pincefödém 4 cm-es hőszigetelést igényel, hogy a megengedett  $0,5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  hőátbocsátási érték alá kerüljön. Az utólagos hőszigetelést és nyílászáró cserét követően a fűtési idény hossza 4632 h/a-ról 3480 h/a-ra csökken, a fűtési energiafogyasztás  $66,14 \text{ kWh}/(\text{m}^2, \text{a})$ -re, így a lakás összesített energetikai jellemzője  $E_p = 130,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2, \text{a})$ -re csökken.

A beruházás becsült összege egy  $70 \text{ m}^2$  lakás esetén  $1,46 \text{ mFt}$ , az éves energia-megtakarítás  $109 \text{ eFt}$ , ami  $13,4$  év megtérülési időt és  $1,37 \text{ t}$  éves  $\text{CO}_2$  kibocsátás-megtakarítást jelent.

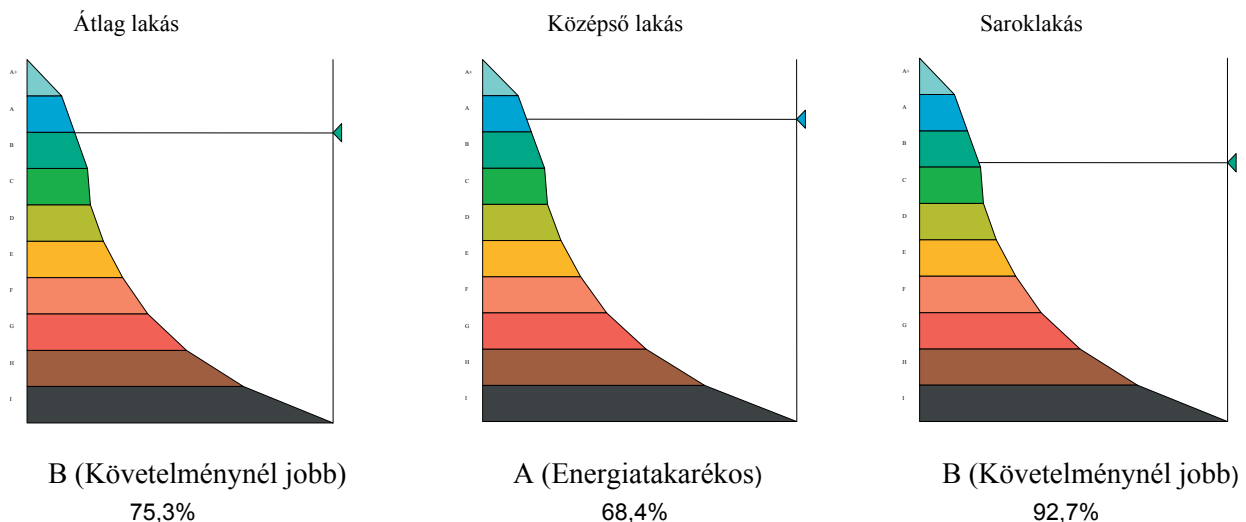
### FŰTÉSI ÉS HMV RENDSZER FELÚJÍTÁSA

Az épületszerkezeti felújításon túlmenően javasoljuk a kondenzációs gázkazán és az arról működő indirekt HMV-tároló beépítését, valamint a hőleadók termosztatikus radiátorszelepekkel történő felszerelését. Ezzel a bemutatott lakás összesített energetikai jellemzője

$$E_p = E_F + E_{\text{HMV}} = 45,78 + 44,27 = 90,05 \text{ kWh}/(\text{m}^2, \text{a})$$

A beruházás összege  $1,75 \text{ mFt}$ , éves energia-megtakarítás  $151 \text{ eFt}$ , ami  $11,6$  év megtérülési időt és  $1,79 \text{ t}$  éves  $\text{CO}_2$  kibocsátás-megtakarítást jelent, így a lakás „A” kategóriássá válik (6. ábra).

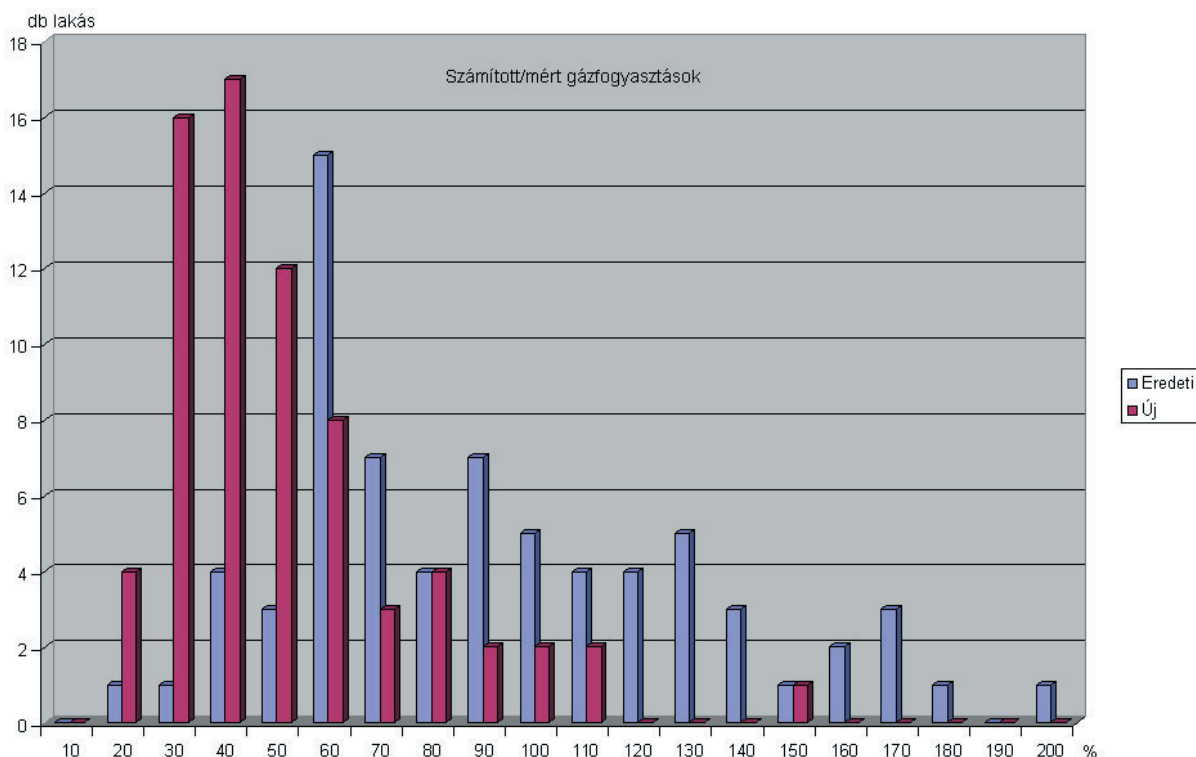
### Felújítás után



6. ábra. A vizsgált épületen belül különböző lakások energiatakarékossága a felújítás után

A vizsgálat során az összes lakástulajdonos részére elkészítettük a lakására vonatkozó energiatakarékossági jelentést a jelenlegi és a felújítás utáni javasolt állapotra. Meghatároztuk a felújítás után a várható gázfogyasztást is. A

7. ábra azt szemlélteti, hogy a javasolt felújítások után a lakások nagy részében a gázfogyasztás a jelenlegi 30-40 %-ára esik vissza.



7. ábra. A vizsgált lakásokban a számított/mért gázfogyasztások aránya

## ÖSSZEGZÉS

Az ECOLISH projekt jelmondata: „*Ne fizessünk többet, mint azelőtt!*” A lakóknak a társasház felújításához olyan pályázati és finanszírozási konstrukcióra van szüksége, ahol ez az elv érvényesül. Pályázati lehetőséget jelent a „Klímaparát Otthon Program 2”, a hagyományos építésű épületekre és lakásokra is kiterjesztett klímavédelmi célú pályázat.

Az ECOLISH projekt keretében megvizsgáltuk a társasházak energia-hatékony felújításának lehetőségeit. Meghatároztuk az egyes lakások, valamint a teljes épületek energetikai tanúsítását jelenleg és meghatároztuk azokat az intézkedéseket, amelyekkel ki lehet elégíteni a 7/2006. TNM rendelet által meghatározott követelményértékeket. A korszerűsítéshez pályázati források is rendelkezésre állnak, valamint ezeknek az EPC (Energy Performance Contracting), vagyis az energiahatékonysági szerződésekkel történő kombinációjának eredményeképpen a felújítás úgy is elvégezhető, hogy a lakóknak minimális, vagy semmilyen önrészre sincs szükségük. Ez a lehetőség különösen jelentős olyan társadalmi rétegeknél, akik anyagi gondokkal küszködnek.

## REFERENCIA

- [1] The Climate action and renewable energy package, European Commission, 2008. (20-20-20)
- [2] 91/2002/EK Épületenergetikai Irányelv (EPBD)
- [3] Épületenergetika, segédlet; PTE PMMK, 2009. Budapest
- [4] 7/2006. TNM rendelet: Az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról
- [5] 176/2008. Kormányrendelet: Az épületek energetikai tanúsításáról
- [6] MSZ EN 15217: Épületek energetikai tanúsításának módszerei
- [7] MSZ EN 15603: Épületek energiafelhasználásának és CO<sub>2</sub> kibocsátásának meghatározása
- [8] www.ecolish.com
- [9] Magyar, Z: Improvement of Energy Efficiency of Low Income Housing (IEE ECOLISH) REHVA General Assembly, Amsterdam, 2009.

# NITINOL HUZAL ÉS TITÁN CSAP HEGESZTÉSE

## WELDING OF NITINOL WIRE AND TITANIUM TIP

Meiszterics Zoltán\*

### ABSTRACT

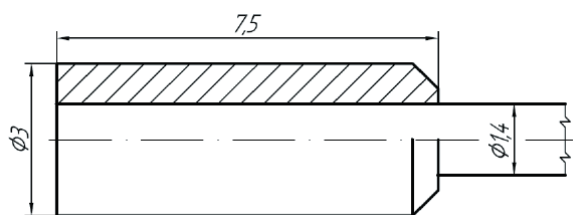
*One of my former student had seen me in connection with a special welding problem in May 2007. He interested in for a purpose of medical application a micro welding project possible solution. The specialities of the problem derived from the size and material of probes. A diameter of 1,4 mm nitinol wire and a diameter of 3 mm tip with a connecting bore had to be welded together.*

*We examined several potential technologies. We needed a well controlled and concentrated heat source, such as the different lasers. At first we tried two types of laser for welding, then on the basis of results we chose resistance welding. We had done the finite element simulation of the resistance welding technology. During the project two students made their thesis.*

*In this article I summarised the results of our work.*

### 1. BEVEZETÉS

2007 májusában egy volt tanítványom egy különleges hegesztési problémával kapcsolatban keresett meg. Orvosi alkalmazás céljaira egy- már inkább mikro hegesztési - feladat lehetséges megoldása után érdeklődött. A feladat különlegességét a hegesztendő anyag és a méretek adták. Egy Nitinol alapanyagú, Ø1,4 mm-es huzalra a hozzá illeszkedő Ø3 mm-es furatos csapot kellett ráhegeszteni.



1. ábra A munkadarab elrendezési vázlata

A feladat megoldására több lehetőséget is megvizsgáltunk. Mindenképpen egy jól szabályozható, kis felületre koncentrálható hőforrásra volt szükség. Ilyenek a

különböző lézerek. Így először kipróbáltuk a lézersugár-hegesztést, majd pedig az eredményekből okulva, ellenállás-hegesztést alkalmaztunk. Az utóbbi technológia igazolására pedig elvégeztük a folyamat végeleges szimulációját. A probléma kapcsán két diplomaterv is íródott. Ebben a cikkben a feladat megoldása kapcsán elvégzett munkát foglaltam össze.

### 2. NITINOL HUZAL JELLEMZÉSE

Ez a legismertebb alakemlékező ötvözet. A tulajdonságai erősen függenek az összetételétől, ezért az ötvözet előállításánál 0,05% pontossággal kell van az alkotók arányát beállítani. Megfelelő hidegalakítással és az azt követő hőkezelési eljárással állítják be az ötvözet alakemlékező tulajdonságait. Rosszul forgácsolható, hagyományos forgácsolási eljárásokkal is megmunkálható, de igen gyors szerszámkopást okoz, ezért elsősorban abrazív eljárásokkal munkálják meg [5].

Irodalmi adatok szerint önmagával összehegesztve az alapanyag szilárdságának 75%-a érhető el [3,5]. Sikeresen alkalmazott eljárások: CO<sub>2</sub> és Nd-YAG lézersugaras hegesztés, AVI hegesztés, ellenállás-hegesztés. Védőgázként argont és héliumot alkalmaztak [3].

Ez az anyag 6% körüli rugalmas és 10%-ot meghaladó teljes alakváltozással rendelkezik [4], amit az úgynevezett ausztenites-martenzites átalakulásnak köszönhet. Az átalakulás hőmérsékletváltozás és mechanikai feszültség hatására is végbemehet. Itt az átalakulás ikerkristály képződéssel megy végbe, így a rácsszerkezetben az atomok nem váltanak szomszédot, így a folyamat reverzibilis, ellentétben az acélok esetében lezajló martenzites átalakulással.

Az alkalmazott huzal anyagspecifikációja:

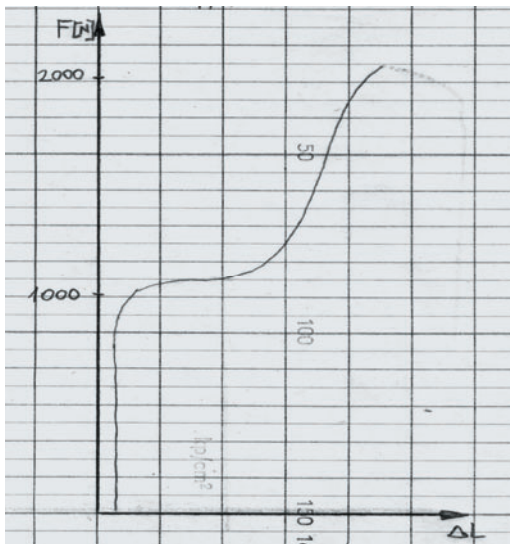
Gyártó: Euroflex Gmh.

Gyártói megnevezés: Nitinol SE508 – szuperrugalmas huzal szoba- és teshőmérsékleti alkalmazásokra.

Kémiai összetétel: Ni 55,8%, Ti maradék, O max. 0,05%, C max. 0,02% tömegszázalék

Hogy legyen viszonyítási alapunk a kötés minősítéséhez elvégeztük az eredeti huzal szakító vizsgálatát. A maximális erő  $F_{max}=2085$  N-ra adódott, ami  $R_m=1354$  MPa szakítószilárdságot jelent.

\* Egyetemi adjunktus, Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki Kar



2. ábra. Nitinol huzal szakítódiagramja

### 3. A CSAP ANYAGÁNAK KIVÁLASZTÁSA

Hegesztés szempontjából legésszerűbb választás a saját anyaggal való összehegesztés lett volna, mivel az irodalmi adatok szerint így lehet elérni a legnagyobb varratszilárdságot [5], de az anyag ára és a furatok elkészítésének nehézségei miatt a megrendelő ezt elvetette.

Először rozsdamentes csapokat küldtek, amit a témával foglalkozó irodalmak alapján gyorsan el kellett vetni, mivel a nitinol Ti tartalma igen nagy affinitást mutat a vassal és olvadék állapotból lehűlve rideg  $TiFe_2$  és  $TiFe$  vegyületi fázisokat alkot [5]. Ezt a kísérletek is alátámasztották, a szemre megfelelő hegesztett varratok a legkisebb hajlításra üvegszerűen eltörték.

A [3] irodalom beszámol  $\varnothing 0,1$  mm-es nitinol és saválló ausztenites acél huzalok Nd-YAG lézerrel való összehegesztéséről, ahol az elért varrat szakítószilárdsága a nitinol szakítószilárdságának majdnem 50%-a. A varratban 900 HV<sub>0,05</sub> keménységet is mértek, ami bizonyítja a rideg fázisok jelenétét.

Ezen intermetallikus vegyületek kialakulását és a varratok elridegését meg lehet akadályozni a két anyagot elválasztó tantál réteg segítségével [5].

Rozsdamentes acél helyett tehát valami más anyagot kellett választani. Kézenfekvőnek tűnt, hogy a nitinol egyik fő alkotója legyen a csap anyaga. Mivel orvosi alkalmazásról volt szó, így az egyébként is biokompatibilis titánt választottuk.

Két különböző anyagminőségű csappal végeztünk hegesztési kísérleteket:

Gyártó: Bibus Metals Ag.

Gyártói megnevezés:

1. ATSM Grade 2– ötvözetlen titán.
2. Grade5 6Al-4V ELI - 6% Al és 4% V tartalmú titánötvözet

### 3. LÉZERHEGESZTÉS

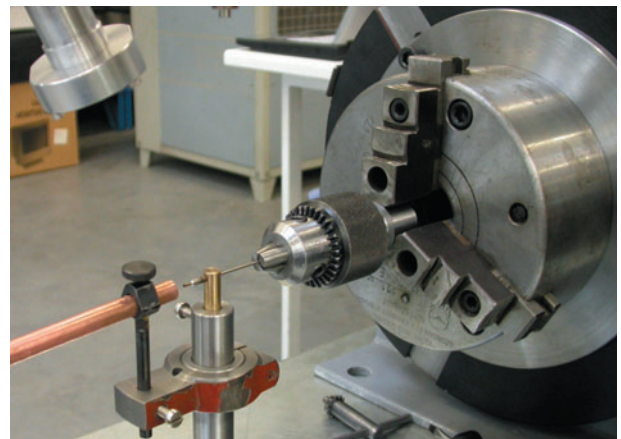
A lézerhegesztést kétféle lézer típusal is elvégeztük. A hegesztési összeállítás lényegében megegyezett a két esetben. A huzalt befogtuk egy vezérelhető forgatóba, majd az álló lézer alatt megfogatva a lézer megfelelő ki és bekapcsolásával kialakult a hegesztett kötés, a hegesztéshez hozaganyagot nem használtunk. A csap letöréssel rendelkező végét megolvasztva alakult ki a hegesztett kötés. A hegesztésnél a legnagyobb problémát a munkadarab forgatás közbeni helyzetének biztosítása adta. Egy furatos állítható vezetővel lehetett megakadályozni a csap forgatás közbeni bolygó mozgását.

Az egyik sugárforrás egy PRC2000 típusú 1800 W maximális teljesítményű CO<sub>2</sub> lézer volt.



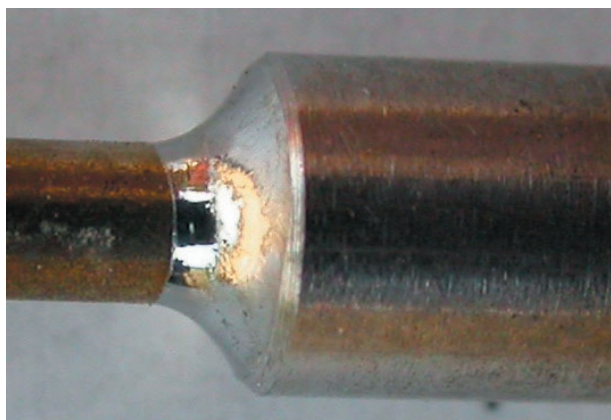
3. ábra. CO<sub>2</sub> lézerrel hegesztett munkadarab

A másik lézer pedig egy SPI redPOWER típusú 100 W maximális teljesítményű szállézer volt, mely sugárforrás csak egyetlen napra állt rendelkezésünkre, így csak egyetlen kísérletsorozat elvégzésére volt módunk.



4. ábra. Kísérleti összeállítás szállézeres hegesztéshez

Mindkét anyagminőséggel készültek varratok, melyeket utána szakítással minősítettünk. A Grade5 minőség esetében kaptunk nagyobb szakító erőt.



5. ábra. Szállézerrel hegesztett varrat

A beállítási paraméterek és a szakító próbák eredményei az 1. táblázatban találhatóak.

Lézer típus	Lézer teljesítmény [W]	Fordulatszám [1/min]	Szakító erő [N]
PRC2000	600	100	705
SPI redPOWER	95	40	533

1. táblázat

A sugárzás fémekben való elnyelődése a szállézeres esetében jobb, mint a CO<sub>2</sub> lézereknél a rövidebb hullámhossznak köszönhetően, így kisebb lézer teljesítmény elegendő azonos varrat létrehozásához. A varratok kívülről sokkal tetszetősebbek voltak, mint a CO<sub>2</sub> lézerrel hegesztett varratok, mégis a szakítóerők elmaradtak azoktól. Ennek a kisebb beolvadás lehetett az oka.

A lézeres hegesztési próbákból azt lehetett leszűrni, hogy nagyon kis keresztmetszettel rendelkezik a varrat, így a szakítóerő nem növelhető jelentősen. Ha a bevitt energiát növeljük, akkor a hő hatására a huzal gyengül meg és az szakad el, kis hő és varratkeresztmetszet mellett pedig a szál szakad ki a csapból.

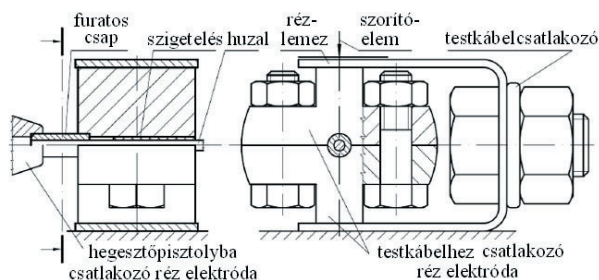
#### 4. ELLENÁLLÁS-HEGESZTÉS [1]

Olyan hegesztési eljárást kellett keresni, amely során a kötés keresztmetszetét lehetett növelni. Ha a csap és a huzal érintkezési felületét lehetne összeolvasztani, úgy hogy a szálát lehetőleg minimális hőhatás érje, akkor várhatóan jelentősen lehet növelni a kötés szilárdságát. Erre a villamos ellenállás hegesztés kiválóan alkalmasnak tűnt.

A hegesztéseket egy HBS gyártmányú ARC800-as típusú transzformátoros csaphegesztő géppel végeztük. A gép névleges árama 800 A, a hegesztési időt 5 és 1000 ms között lehet állítani ms-os lépésközzel.

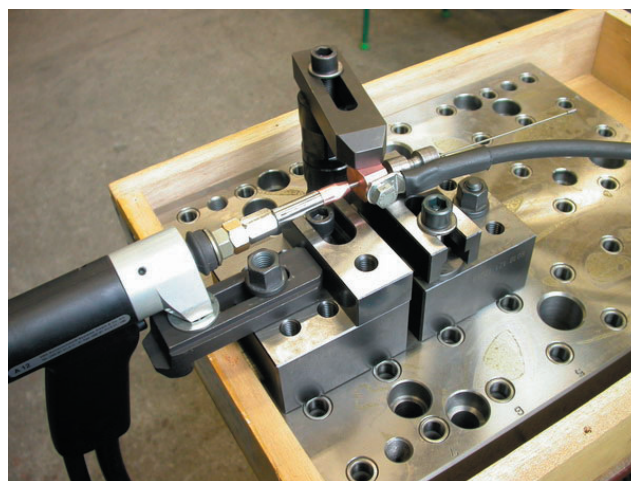
Első próbálkozásként a szálon és a csapon keresztül zártuk az áramkört, reménykedve abban, hogy a csap és a huzal közti átmeneti ellenállás lesz a legnagyobb, így a hő nagy része éppen az összehegesztendő felületen fog keletkezni. Sajnos nem ez volt a helyzet, a minimális hegesztési idő mellett is a keletkező hő hatására szétrobbant a szál.

Ez után jött a gondolat, hogy hagyjuk ki az áramkörből a huzalt. Tegyük a két elektródát a csapra, így az áram csak a csapon keresztül folyik és a csapban keletkező hő közvetve hevíti fel a szálát. Ez abból a szempontból is jó, hogy így el lehet érni, hogy a szál a lehető legkisebb hőt kapja, így a huzal szilárdságcsökkenését minimalizálni lehet. Szerencsés körülmény a hegesztés szempontjából, hogy a titánnak jelentősen magasabb az olvadáspontja, mint a nitinolé.



6. ábra Kísérleti összeállítás elvi vázlata

A hegesztések során a hegesztési időt változtattuk és a maximális szakítóerőt kerestük, ami várhatóan a szál kicsúszásának és a szál szakadásának a határ állapotánál keresendő.



7. ábra. Az egyik ellenállás-hegesztési összeállítás

Már az első próbálkozások nagyon biztatóak voltak. A hegesztések reprodukálhatóságának érdekében összeállítottunk egy befogó készüléket, és többszöri átalakítás után jutottunk el a megfelelő elektróda kialakításig.

A szál nagy keménysége és kis átmérője miatt probléma volt a szakítással, mert az edzett sík befogópofákból minduntalan kicsúszott a szál. Ezért ahhoz a megoldáshoz folyamodtunk, hogy kifűrt szakító próbatetek fej részét használtuk befogó betétként. Így viszont előre fel kellett fűzni a betéteket és a varratokat párosával teszteltük.



8. ábra. A szakító próbatest a felfűzött betétekkel

A kis mennyiségben rendelkezésre álló kísérleti anyag miatt mindig az el nem szakadt varrat mellé hegesztettünk egy új varratot. Ez viszont azt jelentette, hogy minden jól sikerült varrat legalább kétszer lett megterhelve a szakító szilárdságát megközelítő terheléssel, így természetesen a kapott szakítóerők kisebb értéket mutatnak ahhoz képest, mintha a varratokat egyesével terheljük volna.

A hegesztés során a titán csap nem olvadt meg, csak felizzott egy pillanatra, így védőgáz használata nélkül is csak némi elszíneződés volt tapasztalható a csap áramjárta felületén. Védőgáz alkalmazásával még ez az elszíneződés is megszüntethető volt.



9. ábra A csap hegesztés előtt, védőgáz nélkül és Ar védőgázzal hegesztett munkadarab

A kötés kialakításból adódóan nem alkalmazhattunk az összehegesztendő darabok között külső szorítóerőt. A csap és a huzal közötti illesztés fontos tényező ennél az elrendezésnél. A huzal méretét egy Tesamaster típusú 0-25 mm mérés határu mikrométerrel ellenőriztük, az átmérők 1,4004 és 1,4007 mm között változtak. A csapok furatait pedig egy PZO MWD 1139 típusú mű-

helymikroszkóppal mértük meg. A furatátmérők 1,41 és 1,445 mm között változtak. A csapokat a megrendelő készítette el, úgy hogy a csap a huzalra nagyobb erő nélkül felhelyezhető legyen, de ne legyen túl nagy játék a két alkatrész között. A mérések alapján a játék átmérőben 0,04-0,065 mm között változott. A nitinol hőtágulási együtthatója valamivel nagyobb, mint a titán ötvözeté, ez a hegesztés szempontjából jó mivel a hevítési szakaszban az alkatrészek közötti hézag csökken.

Az elért legnagyobb szakítóerő  $F_{max}=870$  N volt, ami terhelést tehát egy másik varrat még kibírt. A hegesztési idő  $t_{heg}=101$  ms volt.

Valószínűsíthető, hogy egy átmeneti illesztés alkalmazásával még tovább lehetett volna növelni a varratok szilárdságát, hiszen így a kötés kialakításakor nagyobb összeszorító erő lépett volna fel a hegesztendő darabok közt. Ezt a lehetőséget jeleztem a megrendelő felé, de a kis méretek miatt nem vállalták a csapok furatainak kívánt tűréssel való elkészítését.

## 5. ELLENÁLLÁS-HEGESZTÉS VÉGESELEMES SZIMULÁCIÓJA [2]

Felmerült a kérdés, hogy a kísérletileg megtalált optimális ellenállás-hegesztési paramétereket meg lehet-e elméleti úton is határozni? Ehhez egy FlexPDE nevű általános célú parciális differenciálegyenleteket megoldó végeelemes szoftvert alkalmaztunk.

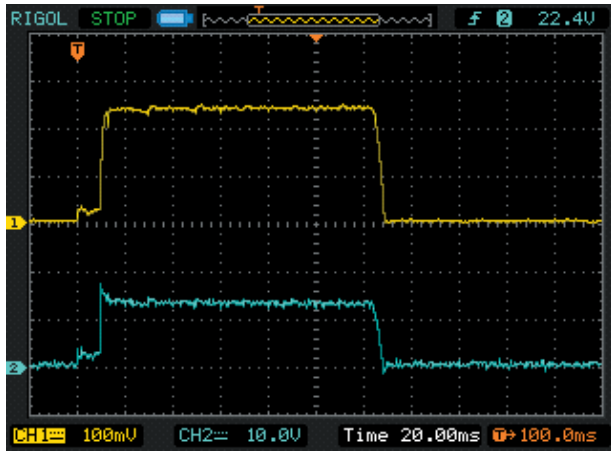
A modellt lépésről lépésre fejlesztettük addig, amíg a szimulációk a gyakorlati tapasztalatainkat meg nem közelítették. Még egy ilyen egyszerű feladat elméleti úton való megoldása is számos problémát vet fel. Mérlegelni kell, hogy mi az, amit el lehet hanyagolni és mi az, amit a jó eredmények érdekében figyelembe kell venni. Alapfeltétel továbbá, hogy a hegesztési folyamatban szerepet játszó fizikai és technológiai paraméterek kellő pontossággal ismertek legyenek.

A munkadarab alakjából következik, hogy hengerkoordináta rendszerben célszerű megoldani a feladatot, a szimmetria miatt pedig elegendő a munkadarab felét vizsgálni. A jól megválasztott koordináta rendszernek jelentős hatása van az elvégzendő számítások mennyiségére, így a program futásidejére.

A darabok méretei miatt a réz elektródákat is bele kellett venni a modellbe, mert hegesztés közben és után jelentős hő vonnak el a munkadarabtól és így jelentősen befolyásolják a hőmérséklet lefutását. A program a geometria megadása után automatikusan elvégzi a hálózást és a pontosabb számítások érdekében menet közben változtatja a háló sűrűségét.

Az áramforrás névleges áramával lefutott szimulációk a tapasztalatoktól jelentősen eltérő eredményeket mutattak, ezért méréssel ellenőriztük a hegesztés során átfolyó áramot. Kiderült, hogy jóval nagyobb a tényleges áram, mint amit feltételeztünk. Ennek oka az, hogy

a csaphegesztő gépet ellenállás-hegesztésre alkalmaztuk. A csaphegesztés ugyanis egy ívhegesztési eljárás, az ív ellenállása pedig nagyobb, mint ami rövidzárlatkor kialakul. Egy RIGOL DS1042CD típusú oszcilloszkóppal, 300A/60mV típusú mérőszónt segítségével rögzítettük az átfolyó áram erősségét, valamint a körön eső feszültség nagyságát.



10. ábra. Az áramerősség és a feszültség időbeli lefutása

A 10. ábrán az egyes csatornán (felül, sárgával) az áramerősség látható – pontosabban a mérőszónton eső feszültség, amelyből számítható az áramerősség -, a kettes csatornán pedig a teljes hegesztési összeállításon eső feszültség. Megfigyelhető, hogy 10 ms ideig egy előáram lép fel, melynek nagysága 200 A, a hegesztőáram időtartama 114 ms, nagysága pedig 1200 A.

Mivel a hegesztés egy külső áramforrással történt, ezért az áramot az áramsűrűség segítségével a következő differenciál egyenlettel adtuk meg:

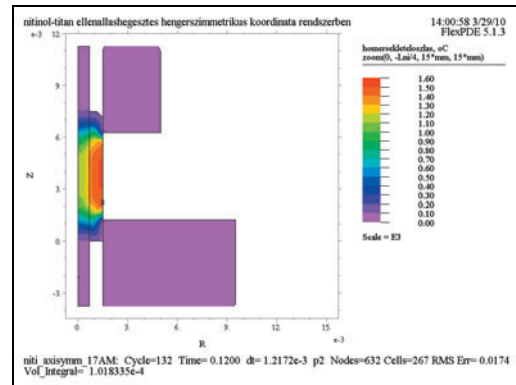
$$\text{div}J = 0$$

ahol  $J$  az áramsűrűség.

Az átfolyó áram hatására keletkező Joule hő a hegesztés hőforrása, a hőmérsékleti mező térbeli és időbeli alakulását a hővezetés differenciálegyenlete írja le:

$$\frac{Q}{\rho \cdot c} + \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t}$$

ahol  $Q$  [W/m<sup>3</sup>] a belső térfogati hőforrás (az átfolyó áram hatására keletkező Joule hő)  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] a sűrűség  
 $c$  [J/kg<sup>o</sup>K] állandó nyomáson vett fajhő  
 $\lambda$  [W/m<sup>o</sup>K] hővezetési tényező  
 $T(r,t)$  [°K] hőmérsékleti mező  
 $t$  [s] idő



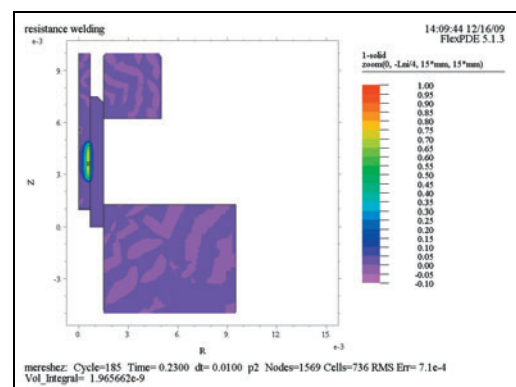
11. ábra. Hőmérsékleti mező a  $t=0,12$  s időpillanatban

A pontosabb számítások érdekében figyelembe vettük a hegesztés során lezajló megolvadást illetve megszilárdulást. Bevezettünk egy új változót- a szilárd fázis mennyiségét (solid)-, aminek értéke a megolvadás során 1-ről 0-ra csökken, megszilárduláskor pedig ismét 1 értéket vesz fel. A véges elemes analízis esetén problémát okoz egy változó hirtelen, ugrásszerű megváltozása. Ezért a megolvadást a hőmérséklet függvényében írtuk le, amit egy kezdeti és egy befejező hőmérséklettel jellemezhetünk. Tehát egy olyan folytonos, jól kezelhető függvényre volt szükség, amely 0 és 1 között változtatja az értékét. Ilyen az  $\text{erfc}$  függvény megfelelő módosítások után.

Az alkalmazott függvény a következőképpen alakult:

$$\text{Solid} = 0,5 \cdot \text{erfc} \left( \frac{4(T - T_{olv})}{T_0} \right)$$

ahol  $T_{olv}$  az olvadáspont  
 $T_0$  annak a hőköznék a fele, ahol a teljes megolvadás bekövetkezik.



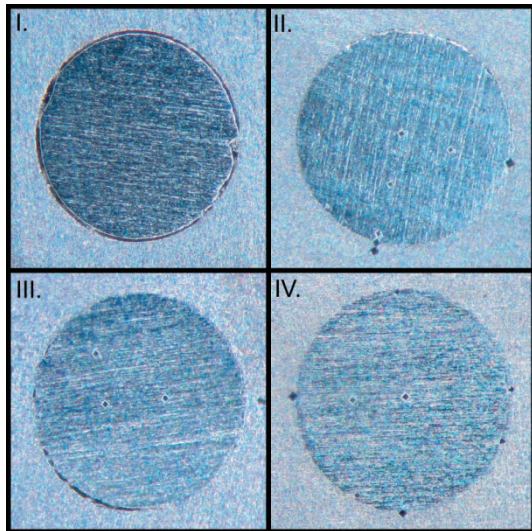
12. ábra. A megolvadt zóna

Az olvadáskor és megszilárduláskor az olvadáshőt egy előjeles hőforrástagként vettük figyelembe a hővezetés differenciálegyenletében.

A differenciálegyenletek megoldásához természetesen

meg kellett adnunk a kezdeti és a peremfeltételeket.

A megolvadás határát úgy vetettük össze a szimulációs eredményekkel, hogy a hegesztett darabokat különböző síkokban elmetszve mikroszkóp alatt megvizsgáltuk. Az I. metszeten látható az eredeti illesztési hézag, ezen a részen nem folyt áram, így itt nem is olvadt össze a két darab. A II-III. metszeten még megfigyelhetők összeolvadási hibák, a IV. metszeten pedig már teljes összeolvadás látható.



13. ábra. A hegesztett darab metszeti képei

A szimulációs eredmények és a mért értékek között 14,5% eltérés adódott, ami már elfogadható pontosságot jelent.

## 5. ÖSSZEFOGLALÓ

Csap anyagaként több lehetőséget megvizsgáltunk, legjobb eredményeket a Grade5 6Al-4V ELI titánötvözet esetén kaptuk.

Két lézer típusal is végeztünk hegesztéseket, de végül is az ellenállás hegesztés ennél a feladatnál minden szempontból jobbnak adódott, mint a lézersugárhegesztés. A berendezés sokkal olcsóbb, a beállítási és a hegesztési idő rövidebb volt, a kötések szakítószilárdsága pedig meghaladta a lézerhegesztéssel elért értékeket. Kísérleti úton meghatároztuk a hegesztési idő optimális értékét, a varratok minősítését szakító vizsgálattal végeztük el. A kísérletek gyorsabb végrehajthatóságának érdekében összeállítottunk egy hegesztő készüléket, az elektródák végső kialakításához pedig több kísérletsorozaton keresztül jutottunk el.

Elvégeztük az ellenállás-hegesztési folyamat végelelemes szimulációját. A szimuláció során meghatároztuk a hőmérsékleti mező időbeli alakulását, a nitinol szál és a titán csap megolvadásának időbeli és

térbeli alakulását. Metszeteket készítettünk a hegesztett darabokból és meghatároztuk az összeolvadás határát. A szimulációs eredmények a tapasztalati értékeket jól közelítik.

A hegesztett kötések megfeleltek az elvárt követelményeknek.

## SUMMARY

We had probed different quality as material of tips and we have got the best results with a Titanium alloy named Gade 5 6Al-4V ELI.

We welded probes with two types of lasers, but in this case the resistance welding is better technology than laser welding from all point of view. The equipment is cheaper, adjusting and welding time are shorter, the strength of beads exceeded the results of laser welding. Experimentally we founded the optimal welding time and qualified the seams with tensile test. For shorter adjusting time, we pieced together a welding fixture and improved the electrodes with tests.

We made the simulation of the resistance welding process with finite element method. We determined the temperature field in function of time and location and simulated the melting and solidification process with the software. The cross sections of the probes were examined at different planes and determined the boundary of melting. Results of simulation are near to practical observations.

The welded beads have fulfilled the requirements.

## 6. IRODALOM

- [1] RAJKÓ P.: Nitinol szál és titán csap hegesztése ellenálláshegesztéssel. Diplomaterv
- [2] SZLIPCSEVICS ZS.: Ellenálláshegesztés végelelemes szimulációja. Diplomaterv
- [3] H. GUGEL, A. SCHUERMAN, W. THEISEN: Laser welding of NiTi wires. Materials Science and Engineering xxx (2007) xxx-xxx
- [4] A. FALVO, F. M. FURGIUELE, C. MALETTA: Laser welding of a NiTi alloy: Mechanical and shape memory behaviour. Materials Science and Engineering A 412 (2005) 235-240
- [5] MING H. WU: Fabrication of Nitinol Materials and Components. Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, Kunming, China, P.285-292 (2001)



# A HŐÁTSZÁRMAZTATÁS KÉTDIMENZIÓS MATEMATIKAI MODELLJÉNEK ANALITIKUS ÉS NUMERIKUS MEGOLDÁSA SPECIÁLIS PEREMFELTÉTELEK MELLETT

## THE ANALYTICAL AND NUMERICAL SOLUTION OF TWO DIMENSIONAL HEAT CONDUCTION PROBLEMS IN CASE OF SPECIAL BOUNDARY CONDITIONS

Perjési-Hámori Ildikó

### ABSTRACT

The goal of the solution of heat conduction problem is to determine the temperature distribution inside the material, namely how the temperature is dependent upon the location. The model of this procedure is an elliptical type of partial differential equation. If the boundary conditions are special ones, the equation can be solved analytically, as well. The symbolical solution can be easily visualized with help of MAPLE computer algebra system; the analysis of the variations of boundary conditions is easily realized. The built or the self-made modules of MAPLE are well usable in complicated problems, so the solution of the heat conduction problem is well teachable in BSc course, as well.

### BEVEZETÉS

A hőátszármasztási feladat megoldásának fő célja, hogy megállapítsuk az anyag belsejében kialakuló hőmérséklet mezőt, vagyis azt, hogyan változik az adott anyag belsejében a hőmérséklet a hely függvényében. A folyamat matematikai modellje egy elliptikus típusú parciális differenciálegyenlet. Speciális peremfeltételek megléte esetén az egyenlet analitikusan is megoldható. A szimbolikus megoldás a MAPLE számítógép-algebrai rendszer segítségével könnyen szemléltethető, a különböző peremfeltételek okozta változások elemzése egyszerűen megoldható. Bonyolultabb feladatoknál jól használhatók a MAPLE beépített vagy saját magunk gyártotta moduljai, így a feladat megoldása mérnöki BSc szakokon is tanítható.

### 1. A FELADAT LEÍRÁSA

Tételezzünk fel homogén közeget, ahol a hőmérséklet eloszlást derékszögű koordináta rendszerben akarjuk meghatározni, vagyis  $T(x,y,z)$ . Tekintünk egy kis elemi  $dx dy dz$  térfogatelemet. Tegyük fel, hogy konduktív hőáramlás valósul meg a közeg felületén. Az áramlási sűrűség vektora felbontható merőleges összetevőkre. Legyen ez  $q_x, q_y, q_z$ . Az ellenoldali hőáramsűrűség [1] :

$$\begin{aligned}q_{x+dx} &= q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \\q_{y+dy} &= q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \\q_{z+dz} &= q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz\end{aligned}\quad (1)$$

Az energiamegmaradás törvénye szerint a ki és bejövő hőáramsűrűségek összege 0, ha feltételezzük, hogy nincs belső hőforrás.

$$q_x + q_y + q_z - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = 0 \quad (2)$$

A (2) egyenletbe (1)-et behelyettesítve kapjuk, hogy

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz = 0 \quad (3)$$

A Fourier törvény szerint:

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

ahol  $k$  a hővezetési tényező.  $[k] = \frac{W}{mK}$

Tehát (3) egyenlet a következő alakúvá válik:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

Ezen másodrendű differenciálegyenlet megoldása szolgáltatja a keresett hőmérséklet eloszlást. A megoldáshoz a peremfeltételek ismerete szükséges.

A következőkben feltételezzük, hogy a hőáramlás gradiense csak egy irányú. A kétdimenziós eset különö-

\* egyetemi docens PTE Pollack Mihály Műszaki Kar  
perjesi@pmmk.pte.hu

sen sarokpontokban jelentős, ahol a külső és belső felületek hőmérséklete különböző.

A feladat ebben az esetben a

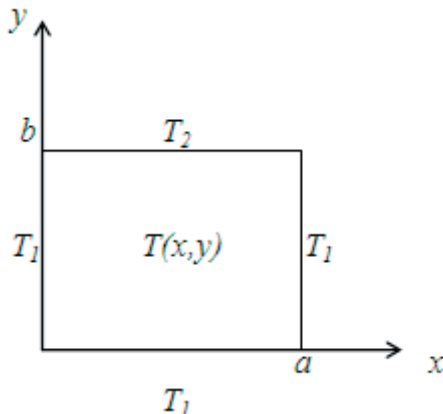
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

Laplace típusú másodrendű parciális differenciálegyenlet megoldása, ami a  $T(x,y)$  függvény meghatározását jelenti. A feladat Dirichlet vagy első peremérték-feladat [2], [3], mert a tartomány határán ismert a hőmérséklet eloszlás.

## 2. A FELADAT ANALITIKUS MEGOLDÁSA A, B OLDALÚ TÉGLALAP TARTOMÁNYRA

Ez csak nagyon speciális alakzatoknál és speciális perem feltételek esetén alkalmazható. A megoldást függvénytörvények segítségével adható meg.

### 2.1 A téglalap 3 oldalán a hőmérséklet $T_1$ , a negyedik oldalon $T_2$ .



1. ábra Példa téglalap tartományra

Legyen  $u = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$

A megoldandó parciális differenciálegyenlet ekkor

$$pde := \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, y) \right) + \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} u(x, y) \right) = 0$$

A keresett  $u(x,y)$  függvényt szeparációs módszerrel illetve Fourier sorfejtés segítségével határozhatjuk meg [4].

$$f_1(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \frac{n\pi x}{a} \quad f_2(x) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin \frac{n\pi x}{a}$$

$$g_1(x) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin \frac{n\pi y}{b} \quad g_2(x) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin \frac{n\pi y}{b}$$

$$A_n = \frac{2}{a} \int_0^a f_1(x) \sin \frac{n\pi x}{a} dx \quad B_n = \frac{2}{a} \int_0^a f_2(x) \sin \frac{n\pi x}{a} dx$$

$$C_n = \frac{2}{b} \int_0^b g_1(x) \sin \frac{n\pi y}{b} dy \quad E_n = \frac{2}{b} \int_0^b g_2(x) \sin \frac{n\pi y}{b} dy$$

$$u(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[ A_n \sinh \frac{n\pi(b-y)}{a} + B_n \sinh \frac{n\pi y}{a} \right] \sin \frac{n\pi x}{a} + \left[ C_n \sinh \frac{n\pi(a-x)}{b} + E_n \sinh \frac{n\pi x}{b} \right] \sin \frac{n\pi y}{b} \right\}$$

A példában az elsőfajú perem feltételek (1. ábra) ekkor

$$0 < x < a \quad 0 < y < b$$

$$u(x, 0) = f_1(x) = 0 \quad u(x, b) = f_2(x) = 1$$

$$u(0, y) = g_1(x) = 0 \quad u(a, y) = g_2(y) = 0$$

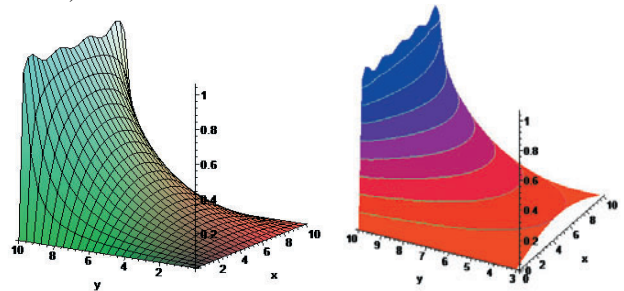
$$a = b = 10 \text{ cm}$$

A megadott kezdeti feltételeknek megfelelő partikuláris megoldást a Fourier sorfejtés segítségével keressük. A Fourier sor első néhány tagja:

$$u(x,y) = \frac{4 \sinh\left(\frac{\pi y}{10}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{10}\right)}{\pi \sinh(\pi)} + \frac{4}{3} \frac{\sinh\left(\frac{3\pi y}{10}\right) \sin\left(\frac{3\pi x}{10}\right)}{\pi \sinh(3\pi)} + \frac{4}{5} \frac{\sinh\left(\frac{\pi y}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{2}\right)}{\pi \sinh(5\pi)} + \frac{4}{7} \frac{\sinh\left(\frac{7\pi y}{10}\right) \sin\left(\frac{7\pi x}{10}\right)}{\pi \sinh(7\pi)}$$

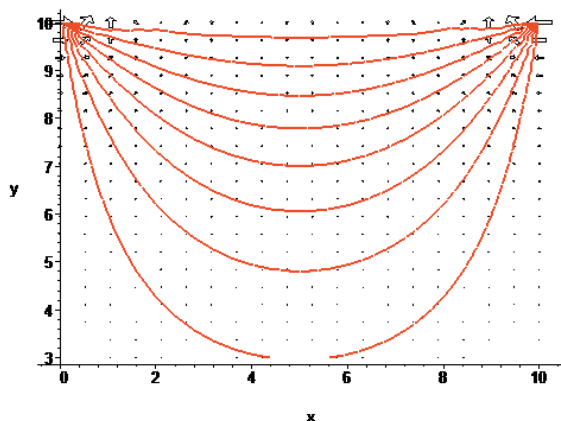
A számítások elvégzéséhez a MAPLE számítógépalgebrai rendszert használtuk, ezért a megoldások szemléltetése, illetve diszkutálása könnyen elvégezhető.

A kapott eredményt többféle módon is ábrázolhatjuk (2. ábra):



2. ábra. A 2.1 feladat megoldása

A MAPLE segítségével lehetőség van az izotermagörök ábrázolására és a gradiensvektorok megjelenítésére is. Az adiabaták az izotermákra merőlegesek, tehát a gradienssel párhuzamos görbék, ezek mentén nincs energia átadás. (3. ábra)



3. ábra A 2.1-es feladathoz tartozó gradiensek és izotermák

### 2.2 A téglalap 2 egymás mellett lévő oldalán a hőmérséklet $T_1$ , a másik 2 oldalon $T_2$

$$0 < x < a \quad 0 < b < y$$

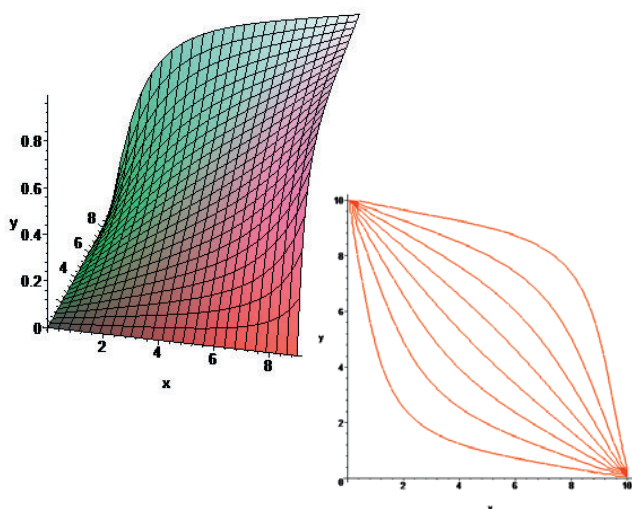
$$u(x, 0) = f_1(x) = 0 \quad u(x, b) = f_2(x) = 1$$

$$u(0, y) = g_1(x) = 0 \quad u(a, y) = g_2(y) = 1$$

Ekkor a feladat megoldása

$$u(x, y) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \left( \frac{\sinh \frac{(2n-1)\pi y}{a} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{a}}{\sinh \frac{(2n-1)\pi b}{a}} + \frac{\sinh \frac{(2n-1)\pi x}{b} \sin \frac{(2n-1)\pi y}{b}}{\sinh \frac{(2n-1)\pi a}{b}} \right)$$

alakú (4. ábra).



4. ábra A 2.2 feladat megoldása

### 2.3 A téglalap 2 szemben lévő oldalán a hőmérséklet $T_1$ , a másik 2 oldalon $T_2$

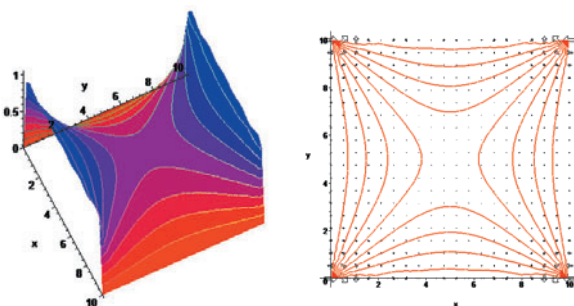
$$0 < x < a \quad 0 < b < y \quad u(x, 0) = f_1(x) = 1$$

$$u(x, b) = f_2(x) = 1 \quad u(0, y) = g_1(x) = 0$$

$$u(a, y) = g_2(y) = 0$$

A megoldás:

$$u(x, y) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \left( \frac{\sinh \frac{(2n-1)\pi(b-y)}{a} + \sinh \frac{(2n-1)\pi y}{a} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{b}}{\sinh \frac{(2n-1)\pi b}{a}} \right) \sin \frac{(2n-1)\pi x}{a}$$



5. ábra A 2.3 feladat megoldása

### 2.4 2 oldal állandó hőmérsékletű, 2 oldalon a hőmérséklet adott függvény szerint változik

Lehetőség van a peremfeltételek tetszőleges függvénnyel való megadására is.

$$0 < x < a \quad 0 < b < y \quad u(x, 0) = f_1(x) = 0$$

$$u(x, b) = f_2(x) = \frac{x^2}{a^2} \quad u(0, y) = g_1(x) = 1$$

$$u(a, y) = g_2(y) = \frac{y}{b} \quad (6. a \text{ ábra})$$

illetve

$$0 < x < a \quad 0 < b < y \quad u(x, 0) = f_1(x) = 0$$

$$u(x, b) = f_2(x) = \frac{x^2}{a^2} \quad u(0, y) = g_1(x) = 0$$

$$u(a, y) = g_2(y) = \frac{y}{b} \quad (6. b. \text{ ábra})$$

A felület ekkor is analitikusan megadható, a megoldás néhány tagja

$$\frac{2(-4 + \pi^2) \sinh\left(\frac{\pi y}{10}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{10}\right)}{\pi^3 \sinh(\pi)} + \left( \frac{4 \sinh\left(\frac{\pi(10-x)}{10}\right)}{\pi \sinh(\pi)} + \frac{2 \sinh\left(\frac{\pi x}{10}\right)}{\pi \sinh(\pi)} \right) \sin\left(\frac{\pi y}{10}\right) - \frac{\sinh\left(\frac{\pi y}{5}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{5}\right)}{\pi \sinh(2\pi)}$$

$$- \frac{\sinh\left(\frac{\pi x}{5}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{5}\right)}{\pi \sinh(2\pi)} + \frac{2(-4 + 9\pi^2) \sinh\left(\frac{3\pi y}{10}\right) \sin\left(\frac{3\pi x}{10}\right)}{27 \pi^3 \sinh(3\pi)}$$

$$+ \left( \frac{4 \sinh\left(\frac{3\pi(10-x)}{10}\right)}{3 \pi \sinh(3\pi)} + \frac{2 \sinh\left(\frac{3\pi x}{10}\right)}{3 \pi \sinh(3\pi)} \right) \sin\left(\frac{3\pi y}{10}\right) - \frac{1 \sinh\left(\frac{2\pi y}{5}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{5}\right)}{2 \pi \sinh(4\pi)}$$

$$- \frac{1 \sinh\left(\frac{2\pi x}{5}\right) \sin\left(\frac{2\pi y}{5}\right)}{2 \pi \sinh(4\pi)}$$

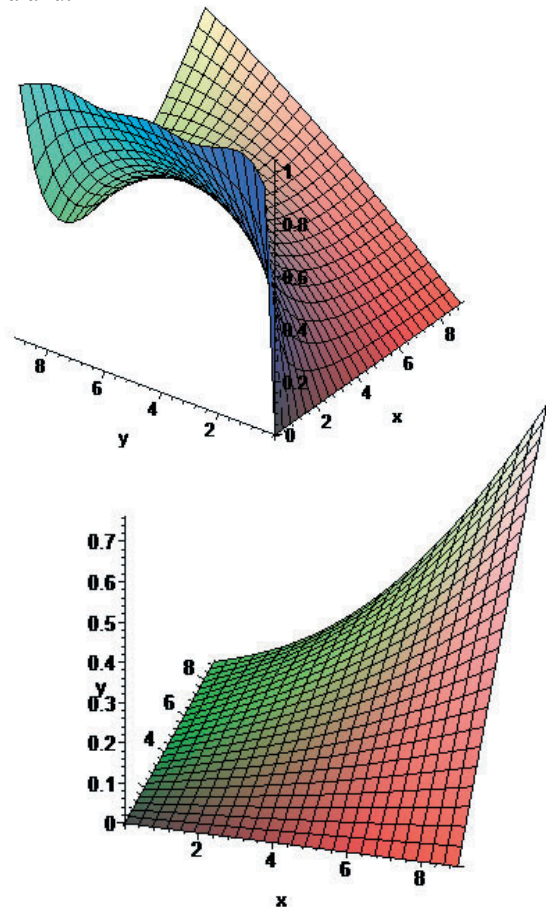
illetve

$$\frac{2(-4 + \pi^2) \sinh\left(\frac{\pi y}{10}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{10}\right)}{\pi^3 \sinh(\pi)} + \frac{2 \sinh\left(\frac{\pi x}{10}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{10}\right)}{\pi \sinh(\pi)} - \frac{\sinh\left(\frac{\pi y}{5}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{5}\right)}{\pi \sinh(2\pi)} - \frac{\sinh\left(\frac{\pi x}{5}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{5}\right)}{\pi \sinh(2\pi)}$$

$$+ \frac{2(-4 + 9\pi^2) \sinh\left(\frac{3\pi y}{10}\right) \sin\left(\frac{3\pi x}{10}\right)}{27 \pi^3 \sinh(3\pi)} + \frac{2 \sinh\left(\frac{3\pi x}{10}\right) \sin\left(\frac{3\pi y}{10}\right)}{3 \pi \sinh(3\pi)} - \frac{1 \sinh\left(\frac{2\pi y}{5}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{5}\right)}{2 \pi \sinh(4\pi)}$$

$$- \frac{1 \sinh\left(\frac{2\pi x}{5}\right) \sin\left(\frac{2\pi y}{5}\right)}{2 \pi \sinh(4\pi)}$$

alakú.



6. ábra A 2.4 feladatok megoldásai

### 3. A probléma numerikus megoldása

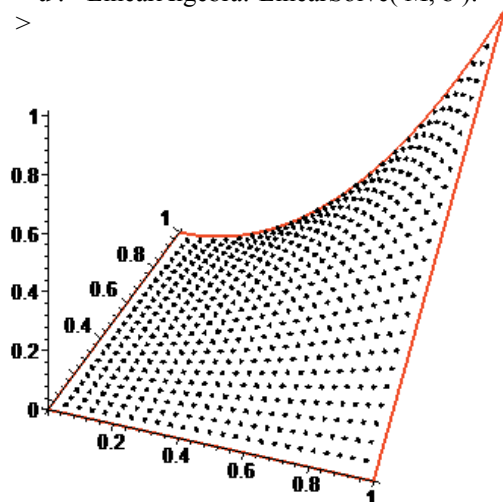
Bonyolultabb határfelületeknél illetve peremfeltételek esetén a megoldás csak véges elem módszerrel, numerikus módon adható meg. ([5], [6], [7], [8]). A MAPLE széles körű lehetőséget kínál a véges elem módszer alkalmazására. A 6. b ábrának megfelelő lineáris egyenletrendszert illetve annak megoldását a következő MAPLE program tartalmazza:

```
> N := 25;
> f := (x, y) -> x^2*y;
> for i from 0 to N do
>   du[i,0] := f(i/N, 0);
>   du[0,i] := f(0, i/N);
>   du[i,N] := f(i/N, 1);
>   du[N,i] := f(1, i/N);
> end do;
> M := Matrix( (N - 1)*(N - 1), (N - 1)*(N - 1),
datatype=float[8] );
> b := Vector( (N - 1)*(N - 1), datatype=float[8] );
> for i from 1 to N - 1 do
>   for j from 1 to N - 1 do
>     posn := (N - 1)*(i - 1) + j;
>     M[posn, posn] := -4;
>     for k from -1 to 1 by 2 do
>       if assigned( du[i + k, j] ) then
>         b[posn] := b[posn] - du[i + k, j];
>       else
>         M[posn, posn + (N - 1)*k] := 1;
>       end if;
>     end do;
>   end do;
> for k from -1 to 1 by 2 do
>   if assigned( du[i, j + k] ) then
```

```

>      b[posn] := b[posn] - du[i, j + k];
>      else
>      M[posn, posn + k] := 1;
>      end if;
>      end do;
>      end do;
> end do;
> u := LinearAlgebra:-LinearSolve( M, b );
>

```



7. ábra Numerikus megoldás

Az eredmény a 7. ábrán található. A 6.b és a 7. ábrákat összehasonlítva jól látszik a megoldások egyezősége. Ellentétben a hiperbolikus és parabolikus típusú parciális differenciálegyenletekkel az elliptikus típusú parciális differenciálegyenletekre a MAPLE 12. verziója még nem tartalmaz beépített numerikus modult, így az adott feladatnak és peremfeltételeknek megfelelő eljárás megírásával válnak jól kezelhetővé az egyenletek.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A mérnöki gyakorlatban megfogalmazott hőátadási feladatok során nehezen megoldható parciális differenciálegyenletre jutunk. Ez analitikus megoldása a matematikai analízis mély ismeretét feltételezi, numerikus megoldása pedig nagyméretű lineáris egyenletrendszer megoldására vezet. A számítógép algebrai rendszerek előtérbe kerülésével ezen feladatok megoldása egyszerűsödik, a feladatok átfogalmazásával kapott újabb problémák gyorsan megoldhatók, az eredményekben történt változások szemléltetésével a feladatok megoldásakor kapott eredmények azok számára is könnyen érthetővé válnak, akik nem szereztek kellő jártasságot a differenciálegyenletek megoldásában.

## SUMMARY

The engineers defined heat conduction problems issue in hardly solvable partial differential equation. The analytical solution of these equations assumes the deep knowledge of mathematical analysis, the numerical solution issue in great linear equation systems. With help of computer algebra systems the solutions of these problems are simplified, the modified problems are quickly solvable, with help of the visualization of changes in the solutions are easily understandable of those colleges, who did not get enough routine in solution of differential equations.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] INCROPERA F.P., DEWITT, D.P. Introduction to Heat Transfer, John Wileyand Sons, New York, 1996.
- [2] SIMON L.-E.A. BADERKO: Másodrendű lineáris parciális differenciálegyenletek Tankönyvkiadó, Budapest, 1983
- [3] S. J, FARLOW: Partial Differential Equations for Scientist and Engineers John Wiley & Sons 1982
- [4] I.Perjési-Hámori, Cs. Sárvári: Teaching Fourier series, partial differential equations and their applications with help of computer algebra system Teaching Mathematics and Computer Science 7/1, 51-68. (2009)
- [5] FROHNER, I., VAJDA, J.: Ein Beitrag zur Bestimmung der inneren und aeusseren Waermeübergangskoeffizienten von Aussenwaenden, *Gesundheit-singenieur*, No 1. 2006. pp.10-14
- [6] J. VAJDA, I. PERJÉSI-HÁMORI: Two dimensional mathematical model of heat-transmission of one- and double-layer building Pollack Periodica Vol. 2, No.3, pp.25-34, 2007.
- [7] L. LAPIDUS, G. F, PINDER: Numerical Solution of Partial differential equations in Science and Engineering John Wiley & Sons 1982
- [8] <http://www.ece.uwaterloo.ca/~dwharder/Numerical-Analysis/15BVPs/elliptic/complete.html>

# A FOGASKEREKES HAJTÓMŰVEK FOKOZATSZÁMÁNAK MEGHATÁROZÁSA

## DEFINITION THE NUMBER OF STAGES BY GEAR UNITS

Dr. Stampfer Mihály\*

### ABSTRACT

*In the early stage of designing gear units, one must make a decision about the number of stages of the wanted speed ratio. The literature gives experience-based recommendation about this problem. In this paper a new method for definition is presented where the number of stages are determined by the basis of two aspects: (1) by the minimal requested volume of the gear units, (2) by the minimal moment of inertia of the gear units.*

### BEVEZETÉS

A hajtóműtervezés korai szakaszában dönteni kell abban a kérdésben, hogy egy kívánt áttételt hány fokozattal (egy, kettő stb.) valósítsunk meg. A probléma megoldására az irodalomban tapasztalatokon alapuló javaslatok találhatók. Ebben a cikkben olyan matematikai összefüggéseket mutatok be, amelyek alapján megállapítható az egy fokozatban megvalósítható áttétel optimális értéke két célfüggvény esetére: (1) a hajtómű legkisebb helyigénye, (2) a hajtómű legkisebb tehetetlenségi nyomatéka.

### 1. A FOGASKERÉKPÁR FŐMÉRETEI

Egy fogaskerékpár főméretei a tengelytáv ( $a_w$ ) és a fogaskerek szélessége ( $b$ ) (1. ábra). E két méret határozza meg a kerékpár helyigényét [1]. További fontos paraméterek még a modul ( $m$ ) és a fogsók ( $z_1, z_2$ ).

A felsorolt paramétereket a fogaskerékpár előtervezésekor ill. méretezésekor kell meghatározni.

A tengelytávot a fogfelületen jelentkező Hertz-feszültség alapján határozzuk meg:

$$a_w \geq 3 \sqrt{\frac{250 \cdot T_1 (u+1)^4}{\xi \cdot \sigma_{HP}^2} \cdot Z^2 \cdot K_H} \quad (1)$$

\*Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki Kar, egyetemi docens

Ahol:

$T_1$  forgatónyomaték a kiskeréken

$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_{NT}}{S_{Hmin}}$  a megengedett Hertz-feszültség

$\sigma_{Hlim}$  a Hertz-feszültség határértéke

$Z_{NT}$  élettartamtényező,

$S_{Hmin}$  biztonsági tényező. Értéke 1,2 és 1,8 (2) között vehető fel.

$Z = Z_E Z_H Z_\epsilon Z_B Z_\beta$  összesített fogfelületi tényező

$Z_E$  rugalmassági tényező.

$Z_H$  gördülőkör-tényező,

$Z_\epsilon$  kapcsolószám-tényező.

$Z_B$  egyfopár-kapcsolódási tényező. Előtervezésnél az értéke 1,2–1,3.

$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta}$  fogferdeség-tényező.

$K_H = K_A K_V K_{H\beta} K_{H\alpha}$  összesített terhelés-tényező,

$K_A$  üzemtényező,

$K_V$  dinamikus tényező, előtervezésnél értéke 1,5

és 2 között választható,

$K_{H\beta}$  fogszélesség menti terheléseloszlás-tényező,

$K_{H\alpha}$  homlok terheléseloszlás-tényező felületi teherbírára,

$\xi = \frac{b}{d_{w1}}$  a fogszélesség-tényező. Kétoldalt csapágyazott kerékre 0,9...1,2 közötti értékre vehetjük föl, kon-

zolosan ágyazott kerékre pedig legfeljebb 0,7-re.

$b$  a fogaskerek szélessége

$d_{w1}$  a kiskerék gördülőkör átmérője.

$u$  a szükséges fogsók-viszonya

Az  $a_w$  meghatározása után a szükséges fogsók-viszony:

$$b = \xi \cdot d_{w1} = \frac{2\xi \cdot a_w}{u + 1} \quad (2)$$

A modul értékét a fogtőfeszültség alapján határozzuk meg:

$$m_n \geq \frac{2000 \cdot T_1}{b \cdot d_{w1} \cdot \sigma_{FP}} \cdot Y \cdot K_F$$

Ahol:  $\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_{NT}}{S_{Fmin}}$

a megengedett fogtőfeszültség,

$\sigma_{Flim}$  a fogtőfeszültség határértéke,

$Y_{NT}$  élettartam tényező,

$S_{Fmin}$  biztonsági tényező. Értéke 1,6 és 2 között vehető fel.

$Y = Y_{Fa} Y_{Sa} Y_e Y_\beta$  összesített fogtő-tényező

$Y_{Fa}$  a fogalaktényező. Előtervezésnél 2,3-ra vehető.

$Y_{Sa}$  a feszültségkoncentrációs tényező. Előtervezésnél 1,5 és 1,7 között vehető fel.

$Y_e$  a kapcsolószám-tényező. Előtervezésnél 0,7-re vehető fel,

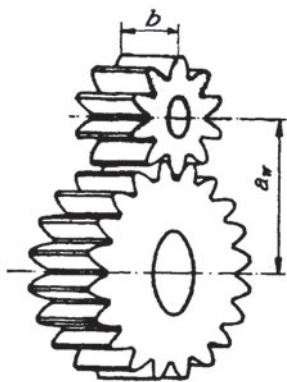
$Y_\beta$  a fogferdeségi tényező,

$K_F = K_A K_v K_{F\beta} K_{F\alpha}$  összesített terhelés-tényező a fogtőre nézve

$K_A$  és a  $K_v$  értéke megegyezik a tengelytáv meghatározásánál már felvett értékekkel.

$K_{F\beta}$  fogszélesség menti terheléseloszlás-tényező fogtő teherbírára. E tényező értéke kisebb, mint a  $K_{H\beta}$  értéke. Előtervezésnél vehetjük azonos vagy valamivel kisebb értékűre.

$K_{F\alpha} = K_{H\alpha}$  homlok terheléseloszlás-tényező fogtő teherbírára.



1. ábra. A fogaskerékpár főméretei

A szükséges fogszámösszeg kiszámításánál feltételezzük, hogy  $\alpha_{wt} \cong \alpha_t$

$$\Sigma z = \frac{2a_w \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha_{wt}}{m_n \cdot \cos \alpha_t}$$

$$\text{A két kerék fogszáma } z_1 = \frac{\Sigma z}{u+1} \quad z_2 = \Sigma z - z_1$$

Mindkét fogszámot a legközelebbi egész számra kell kerekíteni.

## 2. A FOKOZATSZÁM MEGHATÁROZÁSA A HAJTÓMŰ LEGKISEBB HELYIGÉNYE SZERINT

A fogazat helyes kapcsolódását az áttétel nem korlátozza, így az egy fokozatban megvalósítható legnagyobb áttételnek a fogaskerékpár helyigénye szab határt. A hajtómű méreteivel általában egyenesen arányos a hajtómű tömege- és a gyártási költsége is. Az egy fokozatban megvalósítható legnagyobb áttétel értékére az irodalomban tapasztalatokon alapuló javaslatok találhatóak. Ezek értéke 8 (10) [4], 6 (8) [2], 6 (8) [6]. Ebben a

fejezetben matematikai összefüggést mutatok be, amely alapján megállapítható az egy fokozatban megvalósítható áttétel optimális értéke a hajtómű helyigénye szempontjából.

## 2.1 A HAJTÓMŰHÁZ SZÜKSÉGES TÉRFOGATA

### 2.1.1 A térfogatigény egy fogaskerékpár esetére

Egy fogaskerékpár helyigényét egy olyan téglatesttel határozhatjuk meg, amelybe a kerékpár *belehelyezhető* (1. ábra):  $V_{12} = b_{12} \cdot 2a_w \cdot d_{w2}$ .

$$\text{Ahol: } d_{w2} = u \cdot d_{w1} = 2a_w \frac{u}{u+1}, \quad d_{w1} = 2a_w \frac{1}{u+1}$$

$$\text{és ezzel a térfogat kifejezése: } V_{12} = 4 \cdot b_{12} \cdot a_w^2 \cdot \frac{u}{u+1}$$

A fenti kifejezésből látható, hogy a szükséges térfogat elsősorban a tengelytáv függvénye. Ha megvizsgáljuk az 1.1 fejezetben ismertetett tengelytáv-képletet, megállapítható, hogy a tengelytáv értékét a terhelés, az áttétel, a kerek anyagának szilárdsági jellemzői, az összesített fogfelületi tényező és az összesített terhelés-tényező befolyásolják. Tekintettel arra, hogy az elemzésünk célja az optimális fokozatszám meghatározása, a tengelytáv felírható a következő formában:

$$a_w \geq \sqrt[3]{\frac{250 \cdot T_1 (u+1)^4}{\xi \cdot \sigma_{HP}^2} \cdot \frac{1}{u} \cdot Z^2 \cdot K_H} \quad a_w = C \cdot \sqrt[3]{T_1 \frac{(u+1)^4}{u}} \quad (4)$$

Ahol:

$$C = \sqrt[3]{\frac{250}{\xi \cdot \sigma_{HP}^2} \cdot Z^2 \cdot K_H}, \text{ adott esetben állandónak tekinthető.}$$

Ezzel az egyszerűsítéssel élve, a fogaskerékpár térfogatigénye:

$$V_{12} = 4 \cdot b_{12} \cdot C^2 \cdot \left( T_1 \frac{(u+1)^4}{u} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{u}{u+1}$$

$$V_{12} = 4C^2 \cdot T_1^{\frac{2}{3}} \cdot b_{12} (u+1)^{\frac{5}{3}} \cdot u^{\frac{1}{3}} = V_{h1} \quad (5)$$

Ez egyben az egyfokozatú hajtómű térfogatigényének ( $V_{h1}$ ) felel meg.

### 2.1.2 A kétfokozatú hajtómű térfogatigénye

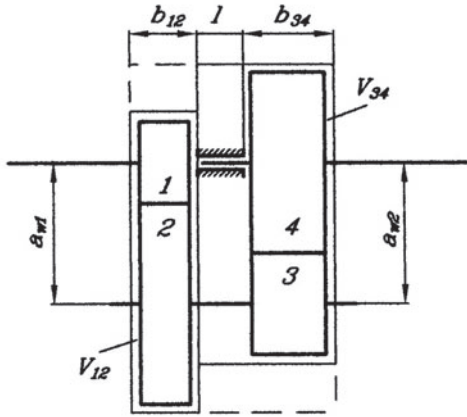
A kétfokozatú hajtóművek esetén megkülönböztetünk párhuzamos- és koaxiális tengelyelrendezésű hajtómű kialakítást. A koaxiális elrendezés kompaktabb hajtóművet eredményez, ezért az elemzés erre a típusra vonatkozik. A kétfokozatú hajtóműbe két pár kereket kell beépíteni, így a helyigény felírható mint:

$$V_{h2} = V_{12} + V_{34} \quad V_{12} = 4 \cdot b_{12} \cdot a_{w1}^2 \cdot \frac{u_1}{u_1+1},$$

$$V_{34} = 4 \cdot (b_{34} + l) \cdot a_{w2}^2 \cdot \frac{u_2}{u_2+1}$$

ahol:  $l$  a csapágyazás szélessége (2. ábra)

$a_{w1}, a_{w2}$  az első- ill. második fokozat tengelytávolsága  
 $b_{12}, b_{34}$  az első- ill. második fokozat kerékszélessége  
 $u_1, u_2$  az első- ill. második fokozat áttétele.



2. ábra. A kétfokozatú koaxiális elrendezésű hajtómű vázlatja

A 2. ábrán látható elrendezés szerint a hajtómű térfogata akkor legkisebb, ha a tengelytávok megegyeznek:

$$a_{w1} = a_{w2}.$$

Ebben az esetben a kétfokozatú hajtómű térfogata:

$$V_{h2} = 4 \cdot b_{12} \cdot a_{w1}^2 \cdot \frac{u_1}{u_1 + 1} + 4 \cdot (b_{34} + l) \cdot a_{w1}^2 \cdot \frac{u_2}{u_2 + 1}$$

$$V_{h2} = 4 \cdot a_{w1}^2 \left[ b_{12} \cdot \frac{u_1}{u_1 + 1} + (b_{34} + l) \cdot \frac{u_2}{u_2 + 1} \right] \quad (6)$$

### 2.1.2.1 A fokozatok áttétele

A hajtómű áttétele megegyezik a kerékpárak áttételeinek szorzatával:

$$u = u_1 \cdot u_2. \quad (7)$$

A hármas kerék forgatónyomatéka:

$$T_3 = u_1 \cdot T_1. \quad (8)$$

A tengelytávok:

$$a_{w1} \geq C \cdot \sqrt[3]{T_1 \frac{(u_1 + 1)^4}{u_1}},$$

$$a_{w2} \geq C \cdot \sqrt[3]{T_1 \cdot u_1 \frac{(u_2 + 1)^4}{u_2}}$$

Az  $a_{w1} = a_{w2}$  feltételből írható fel a következő össz-

$$\text{szefüggés: } \frac{(u_1 + 1)^4}{u_1} = u_1 \frac{(u_2 + 1)^4}{u_2} \quad (9)$$

A fenti kifejezés (9) segítségével összefüggés állapítható meg az első és a második kerékpár áttételei között.

$$\text{illetve } \frac{(u_1 + 1)^4}{u_1^2} = \frac{(u_2 + 1)^4}{u_2} \quad \frac{(u_1 + 1)^2}{u_1} = \frac{(u_2 + 1)^2}{\sqrt{u_2}},$$

$$u_1 + \frac{1}{u_1} = \frac{(u_2 + 1)^2}{\sqrt{u_2}} - 2, \text{ ha a } \frac{(u_2 + 1)^2}{\sqrt{u_2}} - 2 = z \text{ jelölést alkalmazzuk, a fenti egyenlet a következő formában írható fel:}$$

$$u_1^2 - z \cdot u_1 + 1 = 0$$

A másodfokú egyenlet gyökei:

$$(u_1)_{1,2} = \frac{z \pm \sqrt{z^2 - 4}}{2} = \frac{z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{z}{2}\right)^2 - 1}$$

Mivel  $u_1$  értéke egynél nagyobb, az első gyöktétet fogadjuk el és így

$$u_1 = \frac{z}{2} + \sqrt{\left(\frac{z}{2}\right)^2 - 1}, \quad z = \frac{(u_2 + 1)^2}{\sqrt{u_2}} - 2.$$

Ezzel megkaptuk az  $u_1$  és  $u_2$  közötti összefüggést függvény alakjában, amelynek grafikus ábrázolása a 3. ábrán látható. A görbe az  $u_2 = 2,5 \dots 4$  tartományban egyenes vonallal helyettesíthető, amelyet a következő formában írhatunk fel:

$$u_1 \approx 2u_2 \quad (10)$$

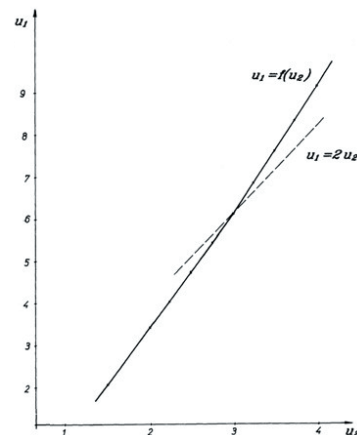
Az ebből adódó hiba nem haladja meg a három százalékos.

Ha ezt az összefüggést behelyettesítjük a hajtómű áttételének képletébe, úgy az egyes fokozatok áttételét kifejezhetjük a hajtómű áttételével:

$$u = u_1 \cdot u_2 = 2u_2 \cdot u_2 = 2 \cdot u_2^2$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{u}{2}} = \frac{\sqrt{u}}{\sqrt{2}} = 0,71\sqrt{u} \quad (11)$$

$$u_1 = 2 \cdot u_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{u}{2}} = \sqrt{2u} = 1,42 \cdot \sqrt{u} \quad (12)$$



3. ábra. Az  $u_1$  függvény grafikus ábrázolása



### 2.1.2.2 A kerékszélesség az első és a második fokozatnál

A kerek szélessége meghatározható a (2) összefüggés szerint:

$$b_{12} = \frac{2\xi_1 \cdot a_{w1}}{u_1 + 1}, \quad b_{34} = \frac{2\xi_2 \cdot a_{w2}}{u_2 + 1}$$

Ha feltételezzük, hogy  $\xi_1 \cong \xi_2$ , és  $a_{w1} = a_{w2}$ , valamint figyelembe vesszük a (10) és (12) egyenleteket, akkor a két kerékszélesség között az alábbi összefüggés írható fel:

$$b_{34} = b_{12} \cdot \frac{2\sqrt{u} + \sqrt{2}}{\sqrt{u} + \sqrt{2}} \quad (13)$$

### 2.1.2.3 A térfogatigény függvénye

Meglévő hajtóművek elemzése alapján, a csapágyazás szélessége megközelítően az első fokozat kerékszélességével megegyezik:  $l \approx b_{12}$

Ezt feltételezve, valamint figyelembe véve a kerek szélességére és a fokozatok áttételeire felírt összefüggéseket, a kétfokozatú hajtómű térfogatigényére a következő összefüggés írható fel:

$$V_{h2} = 4 \cdot a_{w1}^2 \left[ b_{12} \cdot \frac{u_1}{u_1 + 1} + \left( b_{12} \cdot \frac{2\sqrt{u} + \sqrt{2}}{\sqrt{u} + \sqrt{2}} + b_{12} \right) \cdot \frac{u_2}{u_2 + 1} \right]$$

$$V_{h2} = 4 \cdot a_{w1}^2 \cdot b_{12} \left[ \frac{\sqrt{2u}}{\sqrt{2u} + 1} + \frac{3u + 2\sqrt{2u}}{(\sqrt{u} + \sqrt{2})^2} \right],$$

$$a_{w1}^2 = C^2 \cdot T_1^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{(\sqrt{2u} + 1)^8}{\sqrt[3]{2u}}$$

$$V_{h2} = 4b_{12} \cdot C^2 \cdot T_1^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{(\sqrt{2u} + 1)^8}{\sqrt[3]{2u}} \left[ \frac{\sqrt{2u}}{\sqrt{2u} + 1} + \frac{3u + 2\sqrt{2u}}{(\sqrt{u} + \sqrt{2})^2} \right] \quad (14)$$

## 2.2 AZ OPTIMÁLIS FOKOZATSZÁM MEGHATÁROZÁSA A HELYIGÉNY SZEMPONTJÁBÓL

Az egyfokozatú- és a kétfokozatú hajtómű helyigényeinek összehasonlításával meghatározhatók az áttétel tartományok, amelyekben előnyösebb egy- ill. kétfokozatú hajtómű alkalmazása. Az (5) és (14) egyenletek felhasználásával a kétfokozatú és egyfokozatú hajtóművek helyigényének hányadosa a (15) egyenlettel fejezhető ki:

$$\frac{V_{h2}}{V_{h1}} = \frac{\frac{(\sqrt{2u} + 1)^8}{\sqrt[3]{2u}} \left[ \frac{\sqrt{2u}}{\sqrt{2u} + 1} + \frac{3u + 2\sqrt{2u}}{(\sqrt{u} + \sqrt{2})^2} \right]}{(u + 1)^{\frac{5}{3}} \cdot u^{\frac{1}{3}}} \quad (15)$$

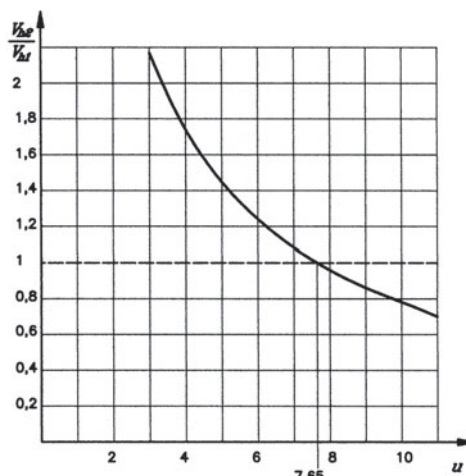
A fenti kifejezés értékének elemzésével döntés hozható a tekintetben, hogy egy vagy kétfokozatú hajtóművet célszerű tervezni, a következők szerint:

$\frac{V_{h2}}{V_{h1}} > 1$  kedvezőbb az egyfokozatú kivitel

$\frac{V_{h2}}{V_{h1}} < 1$  kedvezőbb a kétfokozatú kivitel

$\frac{V_{h2}}{V_{h1}} = 1$  határeset, amikor mindkét esetre azonos a térfogatigény

A térfogatigények viszonyát az áttétel függvényében a 4. ábra mutatja.



4. ábra. A térfogatigények viszonya

Az elvégzett elemzés alapján megállapítható, hogy  $u > 8$  esetén kétfokozatú hajtómű kialakítása célszerű, ill.  $u < 8$  esetén egyfokozatú hajtómű kialakítása kedvezőbb.

## 3. A FOKOZATSZÁM MEGHATÁROZÁSA A HAJTÓMŰ LEGKISEBB TEHETETLENSÉGI NYOMATÉKA SZERINT

Fogaskerekes hajtóművek esetében a tehetetlenségi nyomatékot a forgó alkatrészek adják, ennek értéke elsősorban a fogaskerek méretétől és azok elrendezésétől függ.

### 3.1 A FOGASKERÉKPÁR TEHETETLENSÉGI NYOMATÉKA

A tehetetlenségi nyomaték legyőzéséhez szükséges forgatónyomatékot, a súlyponton áthaladó tengely körül forgó test esetében, a tehetetlenségi nyomaték és a szöggyorsulás szorzataként határozzuk meg:

$$M_z = J_z \cdot \dot{\omega}$$

A kapcsolódó fogaskerékpár szükséges forgatónyomatéka:

$$M = M_1 + M_2 = J_1 \cdot \dot{\omega}_1 + J_2 \cdot \dot{\omega}_2 = \dot{\omega}_1 \left( J_1 + \frac{\omega_2}{\omega_1} J_2 \right)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = i, \quad \omega_1 = i \cdot \omega_2 \quad \text{illetve} \quad \dot{\omega}_1 = i \cdot \dot{\omega}_2$$

$$M = \dot{\omega}_1 \left( J_1 + \frac{1}{i} J_2 \right) = \dot{\omega}_1 \cdot J_{12}$$

ahol:  $J_{12}$  a kapcsolódó fogaskerékpár tehetetlenségi nyomatéka.

$$J_{12} = J_1 + \frac{1}{i} J_2 \quad (16)$$

Reduktor esetén  $i = u$

A tehetetlenségi nyomaték meghatározásánál a fogaskereket hengernek tekinthetjük, melynek átmérője a fogaskerék osztókörével egyenlő.

A henger tehetetlenségi nyomatéka:

$$J = m \cdot \frac{r^2}{2}$$

Ahol:

$m = \rho \cdot V$  a henger tömege

$\rho$  az anyagsűrűség

$$V = r^2 \cdot \pi \cdot b$$

$$\text{ezzel} \quad m = \rho \cdot \pi \cdot b \cdot r^2 = k \cdot b \cdot r^2,$$

ahol:

$k = \rho \cdot \pi$  adott anyag esetére állandónak tekinthető.

Ezzel a henger tehetetlenségi nyomatéka

$$J = k \cdot b \cdot \frac{r^4}{2} \approx k \cdot b \cdot \frac{r_w^4}{2} \quad (17)$$

Ezt behelyettesítve a (16) egyenletbe, a kapcsolódó fogaskerékpár tehetetlenségi nyomatékára a következő kifejezést kapjuk:

$$J_{12} = k \cdot b \cdot \frac{r_{w1}^4}{2} + \frac{1}{u} \cdot k \cdot b \cdot \frac{r_{w2}^4}{2}$$

$$J_{12} = \frac{k \cdot b}{2} \left( r_{w1}^4 + \frac{1}{u} r_{w1}^4 \cdot u^4 \right) = \frac{k \cdot b}{2} r_{w1}^4 (1 + u^3),$$

illetve ha a gördülősugarat a tengelytávval fejezzük ki

$$J_{12} = \frac{k \cdot b}{2} \cdot a_w^4 \cdot \frac{1 + u^3}{(u + 1)^4} \quad (18)$$

### 3.2 A FOGASKEREKES HAJTÓMŰ TEHETLENSÉGI NYOMATÉKA

Egy kívánt áttétel megvalósítható egyfokozatú, kétfokozatú, háromfokozatú, stb. hajtóművel, az áttétel pedig a fokozatok, ill. a fogaskerékpárok áttételének szorzata lesz:

$$\text{két fokozat esetén:} \quad u = u_{12} \cdot u_{34},$$

$$\text{három fokozat esetén} \quad u = u_{12} \cdot u_{34} \cdot u_{56}.$$

#### 3.2.1 Az egyfokozatú hajtómű tehetlenségi nyomatéka

Ha a tengelyek tehetlenségi nyomatékát elhanyagoljuk, akkor az egyfokozatú hajtómű tehetlenségi nyomatéka a fogaskerékpár nyomatékával megegyezik (18).

$$J_{h1} = J_{12} = \frac{k \cdot b}{2} \cdot a_w^4 \cdot \frac{1 + u^3}{(u + 1)^4} \quad (19)$$

#### 3.2.2 A kétfokozatú hajtómű tehetlenségi nyomatéka

Az 5. ábra jelöléseit felhasználva a hajtómű inercia-nyomatéka a következő kifejezéssel írható fel:

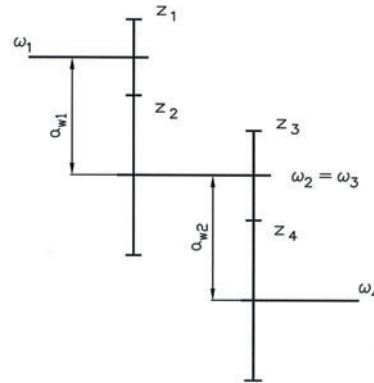
$$M = J_1 \cdot \dot{\omega}_1 + (J_2 + J_3) \cdot \dot{\omega}_2 + J_4 \cdot \dot{\omega}_4$$

$$M = \dot{\omega}_1 \left[ J_1 + \frac{1}{u_{12}} \cdot (J_2 + J_3) + \frac{1}{u_{14}} \cdot J_4 \right] = \dot{\omega}_1 \cdot J_{h2}$$

ahol:  $J_{h2}$  a kétfokozatú hajtómű tehetlenségi nyomatéka,

$$J_{h2} = J_{14} = J_1 + \frac{1}{u_{12}} \cdot (J_2 + J_3) + \frac{1}{u_{14}} \cdot J_4, \quad (20)$$

$J_1, J_2, J_3, J_4$  a kerek egyenkénti tehetlenségi nyomatéka.



5. ábra. Kétfokozatú hajtómű egyszerűsített vázlata

A fogaskerek egyenkénti tehetlenségi nyomatéka az előző fejtegetések szerint:

$$J_j = k \cdot b_j \cdot \frac{r_{wj}^4}{2}, \quad \text{ahol } j=1, 2, 3, 4$$

Az egyszerűbb írásmód érdekében bevezetjük a következő jelöléseket:

$$u_{12} = u_1, \quad u_{34} = u_2, \quad u_{14} = u = u_1 \cdot u_2.$$

Ezzel a kétfokozatú hajtómű tehetlenségi nyomatéka a következő formában írható fel:

$$J_{h2} = k \cdot b_1 \cdot \frac{r_{w1}^4}{2} + \frac{1}{u_1} \cdot k \cdot b_2 \cdot \frac{r_{w2}^4}{2} + \frac{1}{u_1} \cdot k \cdot b_3 \cdot \frac{r_{w3}^4}{2} + \frac{1}{u_1 \cdot u_2} \cdot k \cdot b_4 \cdot \frac{r_{w4}^4}{2} \quad (21)$$

Általában egy-egy kerékpár kerekeinek szélessége azonos, illetve  $b_1 = b_2 = b_{12}$ ,  $b_3 = b_4 = b_{34}$ .

A gördülősugarakat a tengelytávval fejezzük ki, illetve

$$r_{w1} = \frac{a_{w1}}{u_1 + 1}, \quad r_{w2} = u_1 \cdot \frac{a_{w1}}{u_1 + 1}$$

$$r_{w3} = \frac{a_{w2}}{u_2 + 1}, \quad r_{w4} = u_2 \cdot \frac{a_{w2}}{u_2 + 1}$$

Ezeket behelyettesítve, a kétfokozatú hajtómű tehetetlenségi nyomatéka a következő alakban írható fel:

$$J_{h2} = \frac{k}{2} \left[ b_{12} \cdot a_{w1}^4 \frac{1+u_1^3}{(u_1+1)^4} + \frac{1}{u_1} b_{34} \cdot a_{w2}^4 \frac{1+u_2^3}{(u_2+1)^4} \right] \quad (22)$$

Hasonló módon eljuthatunk a háromfokozatú hajtómű tehetetlenségi nyomatékának kifejezéséhez, de itt csak az egy- és kétfokozatú hajtómű elemzésére szorítkozunk.

### 3. 3 AZ OPTIMÁLIS FOKOZATSZÁM A HAJTÓMŰ TEHETETLENSÉGI NYOMATÉKA SZERINT

Az egyfokozatú- valamint a kétfokozatú hajtómű tehetetlenségi nyomatékát leíró kifejezések elemzésével megállapítható, hogy a tehetetlenségi nyomatékot a legnagyobb mértékben a tengelytáv befolyásolja (a negyedik hatványon) valamint a kerekek szélessége és az áttétel.

Ha megnézzük a tengelytávot meghatározó képletet (1), láthatjuk, hogy a tengelytáv értéke is függ az áttételtől.

A tengelytáv képletében szereplő mennyiségek a forgatónyomaték és az áttétel kivételével, adott anyagpárosítás és üzemfeltételek mellett, esetünkben állandónak tekinthetők és így a tengelytáv egyszerűsítve felírható:

$$a_w^3 \geq C \cdot T_1 \cdot \frac{(u+1)^4}{u} \quad (23)$$

$$\text{ahol: } C = \frac{250}{\xi \cdot \sigma_{HP}^2} \cdot Z^2 \cdot K_H$$

Kétfokozatú hajtómű esetén a tengelytáv számítását külön végezzük az első- ill. második fokozatra. Figyelembe véve fokozatok áttételei, valamint a forgatónyomatékok közötti összefüggéseket (7), (8), a tengelytávok kifejezései a következők lesznek:

$$a_{w1}^3 \geq C \cdot T_1 \cdot \frac{(u_1+1)^4}{u_1} \quad (24)$$

$$a_{w2}^3 \geq C \cdot T_1 \cdot u_1 \cdot \frac{(u_2+1)^4}{u_2} \quad (25)$$

Ezeket a kifejezéseket behelyettesítjük a tehetetlenségi nyomatékok képletébe (19), (22), így azok a következő alakban írhatók fel:

$$J_{h1} = \frac{k}{2} \cdot (T_1 \cdot C)^{4/3} \cdot b \cdot \frac{1+u^3}{u^{4/3}} \cdot (u+1)^{4/3}$$

$$J_{h2} = \frac{k}{2} (T_1 C)^{4/3} \left[ b_{12} \frac{1+u_1^3}{u_1^{4/3}} (u_1+1)^{4/3} + b_{34} \frac{1+u_2^3}{u_2^{4/3}} (u_2+1)^{4/3} \cdot u_1^{1/3} \right]$$

Célunk a tehetetlenségi nyomatékok összehasonlítása, amikor az áttételt egy- vagy kétfokozattal valósítjuk meg. A  $T_1$ ,  $C$  és  $k$  ismeretlenek kiiktatása céljából vizsgáljuk a két egyenlet hányadosát:

$$\frac{J_{h2}}{J_{h1}} = \frac{u^{4/3}}{1+u^3} \cdot \frac{1}{(u+1)^{4/3}} \cdot \left[ \frac{b_{12}}{b} \cdot \frac{1+u_1^3}{u_1^{4/3}} \cdot (u_1+1)^{4/3} + \frac{b_{34}}{b} \cdot \frac{1+u_2^3}{u_2^{4/3}} \cdot (u_2+1)^{4/3} \cdot u_1^{1/3} \right] \quad (26)$$

A fenti kifejezés értékének elemzésével döntés hozható a tekintetben, hogy egy vagy kétfokozatú hajtóművet célszerű tervezni, a következők szerint:

$$\frac{J_{h2}}{J_{h1}} > 1 \quad \text{kedvezőbb az egyfokozatú kivitel}$$

$$\frac{J_{h2}}{J_{h1}} < 1 \quad \text{kedvezőbb a kétfokozatú kivitel}$$

$$\frac{J_{h2}}{J_{h1}} = 1 \quad \text{határeset, amikor mindkét esetre azonos a}$$

tehetetlenségi nyomaték

A (26) kifejezésben szerepelnek a kerekek szélességének viszonyai, ezek kifejezhetők az áttételek függvényeként, felhasználva a (2), (23), (24) és (25) összefüggéseket.

A fogszélesség-tényező értékét vegyük egyenlőnek:

$$\xi = \xi_{12} = \xi_{34}$$

$$b = \xi \cdot \frac{2 \cdot a_w}{u+1} = 2\xi \cdot (C \cdot T_1)^{1/3} \cdot \left( \frac{u+1}{u} \right)^{1/3}$$

$$b_{12} = \xi_{12} \cdot \frac{2 \cdot a_{w1}}{u_1+1} = 2\xi \cdot (C \cdot T_1)^{1/3} \cdot \left( \frac{u_1+1}{u_1} \right)^{1/3}$$

$$b_{12} = \xi_{12} \cdot \frac{2 \cdot a_{w1}}{u_1+1} = 2\xi \cdot (C \cdot T_1)^{1/3} \cdot u_1^{1/3} \cdot \left( \frac{u_2+1}{u_2} \right)^{1/3}$$

$$\frac{b_{12}}{b} = \left[ \frac{u \cdot (u_1+1)}{u_1 \cdot (u+1)} \right]^{1/3}$$

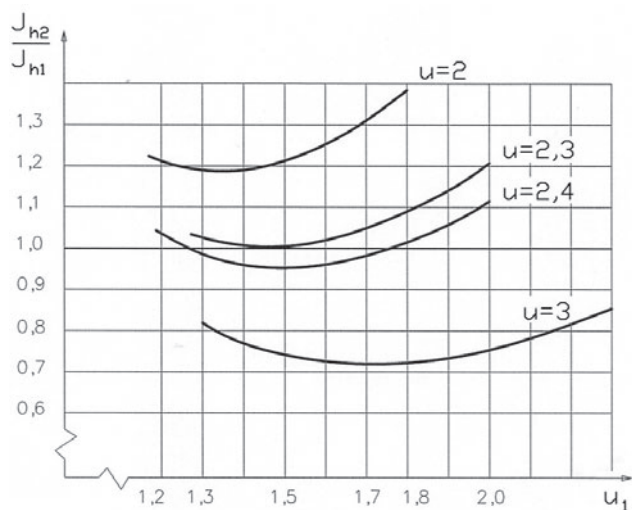
$$\frac{b_{34}}{b} = u_1^{1/3} \cdot \left[ \frac{u \cdot (u_2+1)}{u_2 \cdot (u+1)} \right]^{1/3}$$

A második fokozat áttételét kifejezhetjük a (7) össze-

$$\text{függésből, ill.: } u_2 = \frac{u}{u_1}$$

Így két ismeretlenes igen bonyolult egyenleteket kapunk. Az  $u$  és  $u_1$  értékeket felvéve a tehetetlenségi nyomatékok hányadosa meghatározható és ez egy térgörbével grafikusán ábrázolható. Ha az  $u$  áttétel értékére különböző konstans értékeket veszünk fel, akkor az  $u_1$  változó függvényében egy görbenyalábot kapunk (6. ábra).

Ezek kiértékelésével megállapítható, hogy amikor az át-tétel,  $u = 2,4$  felett van, akkor a tehetetlenségi nyomaték tekintetében kedvezőbb a kétfokozatú hajtómű.



6. ábra. A tehetetlenségi nyomatékok viszonya

### ÖSSZEFOGLALÓ

A cikkben két analitikai összefüggéseken alapuló módszer került bemutatásra a fokozatok számának meghatározására. Az elemzés csak az egy- és kétfokozatú fogaskerekes hajtóművekre terjed ki.

Az elvégzett elemzés eredményeként megállapítható, hogy a hajtómű legkisebb helyigénye tekintetében,  $u > 8$  esetén kétfokozatú hajtómű kialakítása célszerű, ill.  $u < 8$  esetén egyfokozatú hajtómű kialakítása kedvezőbb.

Abban az esetben, amikor a kitűzött cél a legkisebb tehetetlenségi nyomaték, akkor,  $u = 2,4$  felett a hajtóművet célszerű kétfokozatúra tervezni.

### CONCLUSION

In this paper the possibility for definition the number of stages on the basis of analytical dependencies is presented. The analysis covers only gear units with one and two stages.

On the basis of fulfilled analysis it can be established that by the minimal requested volume of the gear units by  $u > 8$ , two stages is recommended, while in cases when  $u < 8$ , the gear unit design with one stages is fair.

In cases when the goal is the minimal moment of inertia of the gear units, then over the ratio value  $u = 2,4$  it is practical to design the gear unit with two stages.

### IRODALOM

- [1] ERNEY GY.: Fogaskerekek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983.
- [2] HABERHAUER H., BODENSTEIN F.: Maschinenelemente, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005.
- [3] STAMPFER M.: Optimisation the number of stages by gear units, Gépészet 2008, SIXT CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING, Budapest, 2008
- [4] ROLOFF H., MATEK W.: Maschinenelemente, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1994.
- [5] DORMÁN L.: Gépelemek III, Atlantis, Újvidék, 1999.
- [6] MILTENOVIC V.: Mašinski elementi, Grafika-Galeb, Niš, 2001.
- [7] DIN 3990 Teil 1.

# AZ ÚJ GENERÁCIÓS GRAFIKUS HARDVEREK BEVONÁSA A MEGMUNKÁLÁS-SZIMULÁCIÓS ELJÁRÁSOKBA

## INVOLVING OF NEW-GENERATION GRAPHICS HARDWARE INTO MACHINING SIMULATION PROCESSES

Tukora Balázs\*, Szalay Tibor\*\*

### ABSTRACT

*The way of using up of the graphics hardware has revolutionary changed in the recent years. The new-generation graphics processors are able to execute high-complexity graphical and non-graphical tasks without the contribution of the central processing unit (CPU) of the computer. The main advantages of general-purpose (i.e. non-graphical) usage appear at the execution of highly parallelized processes: the increasing of speed can reach even one or two orders of magnitude in comparison with the CPU-based solutions. As many of the mechanical simulation processes possesses this nature, the braking through of the new technology is predicted in this field as well. In this article the applicability of the new method is shown by the example of the material removal simulation of free-form objects.*

### 1. BEVEZETÉS

A számítástechnika fejlődése során mindinkább fontossá vált a képi megjelenítés minősége. A személyi számítógépek megjelenése után nem sokkal piacra kerültek az első videokártyák, amelyek a grafikus feladatok terhére átvették a központi egységtől. Ettől fogva a grafikus hardverek fejlődése töretlen. 2003-ra a grafikus kártyák számítási teljesítménye elérte a személyi számítógépek központi egységének teljesítményét, a másodpercenkénti egymilliárd lebegőpontos utasítás (1 GFLOPS) végrehajtásának képességét (dupla pontosságú számítások tekintetében), 2008-ra pedig jelentősen túl is szárnyalta azt: az Intel leggyorsabb, asztali számítógépbe szánt processzorának 70 GFLOPS-os teljesít-

ményéhez képest az ATI grafikus processzora 240 GFLOPS-ot ért el [1][2][3].

A megjelenítés minőségének növekedése magával vonta a grafikus hardverek programozhatóságának igényét is. Az ezredforduló táján találkozhattunk először a *shader* kifejezéssel. Ez kezdetben olyan programcskát jelentett, amely a grafikus hardveren futott, és a képernyőn megjelenő képpontokon végzett utólagos műveleteket (pl. fémes csillogást adva egy jármű színének). A későbbiekben a *shader*ek egyéb feladatok elvégzésére is képessé váltak, mint például a kirajzolandó objektumok térbeli transzformációjára vagy megvilágítási számításokra.

Az elmúlt néhány évben mérföldkövéhez érkezett a grafikus hardverek fejlesztése, az ún. *egységesített architektúrájú eszközök* megjelenésével. Korábban a *shader*ek dedikált hardveregységeken futottak: minden *shader*-típusnak megvolt a saját hardverterülete, amelyet az adott típusú feladat végrehajtására optimalizáltak. A megoldásnak az előnyei mellett volt egy nagy hátránya is: a különböző hardveregységek nem tudtak egymástól átvenni feladatokat, így a gyorsabbak a munkájuk elvégzése után többnyire tétlenül várakoztak a lassabbakra. Egységesített architektúra esetén a különböző *shader*ek ugyanazon hardver-területet használják, az „egységes” hardveren egymással párhuzamosan futnak, így egyensúlyozva ki a részegységek korábbi egyenetlen terhelését. A grafikus hardverből így nagy teljesítményű, általános célú számítási egység vált, ami lehetővé teszi olyan *shader*ek definiálását is, amelyek feladata már nem a képi megjelenítés javítása, hanem például fizikai jellegű szimulációs számítások elvégzése. Az új felépítésű hardver gyorsasága leginkább a nagyfokú párhuzamosítást igénylő számítások végzésénél jelentkezik –, a grafikai jellegű feladatokra optimalizált architektúrájának köszönhetően.

Az egységesített architektúrájú grafikus hardverek megjelenése óta sorra jelennek meg publikációk, amelyek a legkülönbözőbb tudományos területeken bizonyítják az új platformon végzett szimulációs számítások

\* Egyetemi adjunktus, Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki Kar

\*\* Egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar

hatékonyságát. A meteorológiai modellezéstől kezdve a molekulák dinamikai viselkedésének vizsgálatán át a kódfejtő algoritmusokig számtalan alkalmazás született az új architektúrára [4][5][6]. A teljesítménynövekedés sok esetben egészen megdöbbentő: az NVidia grafikus hardvergyártó cég honlapját böngészve rengeteg példával találkozhatunk, amelyek közt nem ritka a több százszoros, de akár több ezerszeres sebességnövekedésről tett bejelentés a hagyományos, CPU alapú számításokhoz képest [7].

A Pécsi Tudományegyetem Pollack Mihály Műszaki Karának Műszaki Informatika Tanszékén 2008-ban kezdődtek el az új technológia megismerésére és kiaknázására irányuló kutatások. Olyan területen kívántuk hasznosítani a fejlesztések eredményeit, ahol a fokozott számítási igény nagymértékben párhuzamosított végrehajtási jelleggel párosul, ám a fellelhető megoldások még a hagyományos, CPU-alapú szekvenciális módot követik.

A komplex munkadarabokat eredményező anyageltávolítás szimulációja megfelelő alkalmazási példának ígérkezett. Egyrészt erősen grafikus jellege miatt, ez ugyanis megkönnyíti a számítógépes grafikai eljárásokhoz visszanyúló programozási módszerek használatát, másrészt azért, mert az anyageltávolítást elszenvedő munkadarab geometriájának aktualizálása nagy mennyiségű adaton való gyors számítást igényel a megmunkálás során [8]. A CAM rendszerek gyártói még nem éltek az új technológia adta lehetőségekkel – valószínűleg az igen bonyolult rendszereik gyökeres átalakítással szembeni „tehetetlensége” miatt –, úgy tűnt tehát, hogy az új alapokról elindulva érdemes belevágnunk az ilyen irányú kísérletekbe.

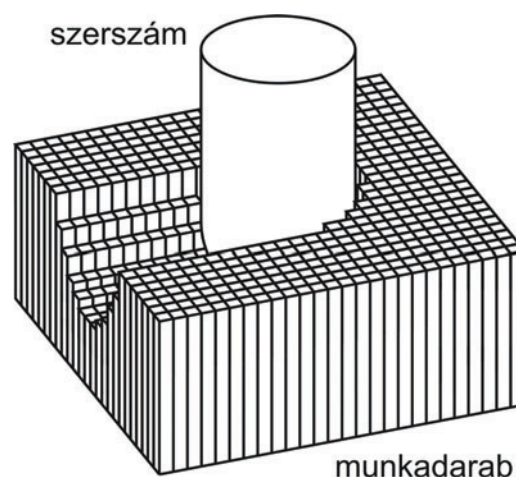
Cikkünk az anyageltávolítás-szimuláció grafikus hardver alapú megvalósítása során eddig elért eredményeinket mutatja be. Tapasztalataink szerint az új technológia jelentős mértékű javulást eredményez a vizsgált szimuláció gyorsaságában és minőségében, és joggal feltételezhető, hogy más gépészeti célú szimulációs eljárások esetén is hasonló javulás érhető el.

## 2. A MEGFELELŐ TÉRFOGAT-REPREZENTÁCIÓS ELJÁRÁS KIVÁLASZTÁSA

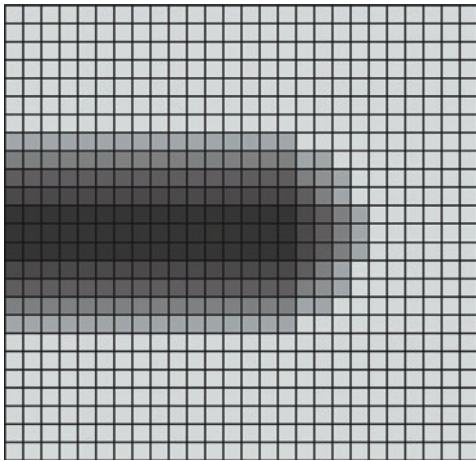
Az anyageltávolítást szimulációjára szolgáló módszerek két csoportba sorolhatók: az analitikus és a közelítő (diszkrét) eljárások közé [9]. Analitikus módszerek esetén a vágószerszám végighalad a szerszám pályán, és bizonyos időközönként a konstruktív szilárdtestgeometria (CSG, Constructive Solid Geometry) szabályai szerinti kivonás művelettel szimuláljuk az anyageltávolítást. Az eljárás legfőbb hátránya az  $O(N^4)$  számítási igény, ahol  $N$  a szerszám pályája pontjainak száma. Komplex feladatoknál ez több tízezer pontot is jelenthet, ami majdhogynem lehetetlenné teszi az alkalmazható-

ságát. Bonyolult szerszámok esetén további problémát jelent azok megfelelő analitikus leírása is. Mindezek ellenére a CAM rendszerek gyártói használják az eljárást, de legfeljebb 3+2 tengelyes megmunkálásoknál, mivel a szabad formájú felületekkel határolt testek reprezentációja gyakorlatilag nem megoldható analitikusan.

Manapság a közelítő eljárások az elterjedtebbek, kisebb erőforrás-igényüknek köszönhetően. Ebben az esetben a munkadarab és a szerszám reprezentációja diszkrét térben történik; a szimuláció minőségét a felbontás határozza meg. *Kép-alapú diszkrét eljárásról* akkor beszélünk, ha a munkadarab geometriáját digitális kép formájában írjuk le: a munkadarabot azonos keresztmetszetű párhuzamos hasábokra bontjuk a megmunkálás irányából (*1. ábra*), s ezek hosszát egy kétdimenziós adathalmazban, képben tároljuk. A hasáboknak a keresztmetszetükön mért oldalhosszúsága jellemzi a felbontás minőségét. Amennyiben a munkadarab és a képernyő felbontása megegyezik, a hasábok egy mélységi kép (depth image) pixeleiként ábrázolhatók, amely a számítógépes grafika egy általánosan használt formátuma (*2. ábra*) [10]. (A mélységi képben nincsenek színinformációk, csupán egyetlen adat képpontokként, amely általában a kamerától mért távolságot jelzi.) A vágószerszám söpört térfogatát az előzővel megegyező irányból felvett újabb mélységi képpel írjuk le. Ezek után a munkadarabból kimetszett részt a két mélységi kép összetartozó pixel-értékeinek kivonásával számítjuk. Mivel ez a művelet a grafikus hardverek által széles körben támogatott, igen gyors és egyszerűen megvalósítható eljárásról beszélhetünk.

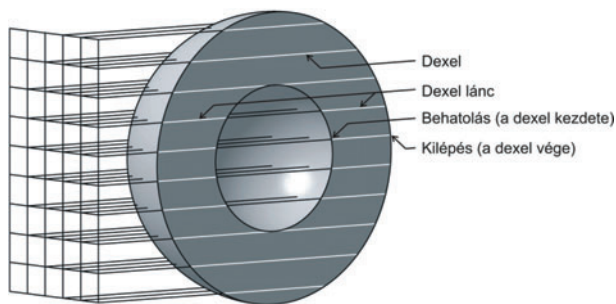


1. ábra. Kép alapú ábrázolás



2. ábra. A munkadarab mélységi képe

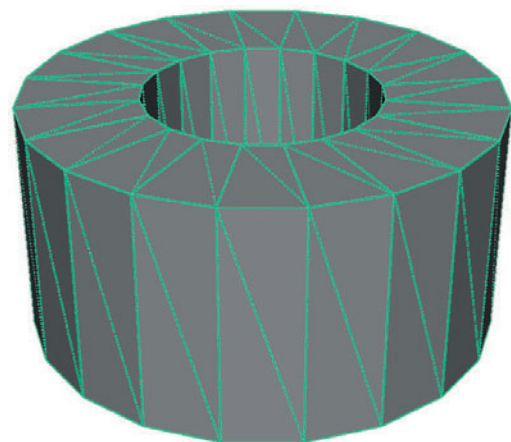
Kép alapú eljárással kizárólag olyan anyageltávolítás-szimulációk végezhetők, amelyeknél a szerszám csak egyetlen irányból végez megmunkálást –, ez pedig nem igaz a többszempontú megmunkálásra. Az így kialakított testeken ugyanis bármely nézőpontból találhatunk takart felületeket, márpedig az egymás mögötti felületek egyetlen mélységi képben nem ábrázolhatók. A probléma megoldására született meg a *dexel-bázisú eljárás* [11]. A dexel elnevezés a „depht element”, „mélységi alkotóelem” kifejezésből származik. Egy kiválasztott nézőpont felől párhuzamos egyeneseket indítunk az objektum felé. Ahol egy egyenes behatol az anyagba (a felénk néző felületen át), egy dexel kezdődik, ahol pedig elhagyja a testet (a hátsó felületen át), véget ér a dexel. A dexeleket kezdő- és végkoordinátaikkal reprezentáljuk a memóriában, az egymás mögötti dexeleket pedig láncba fűzve tároljuk, a legközelebbi felülettől elindulva egészen a leghátsóig.



3. ábra. Dexel-bázisú eljárás

A dexel-bázisú módszer, bár a kép-alapú eljárásokból fejlődött ki, a diszkrét módszerek másik csoportjához tartozik: a *térfogat-alapú (volumetrikus) eljárások* közé. Ebben az esetben a munkadarab által kitöltött tér különböző térfogatelemekeken végzett Boole-algebrai műveletekkel (dexelek vagy apró kockák, ún. *voxelek* uniójaként), bizonyos térfogategységek (pl. tér-nyolcadok) dekompozíciójával, vagy a belső részeket körülvevő héj

leírásával kerül definiálásra. Ez utóbbi eljárást BRep-nek, (Boundary Representation, magyarul „határfelület reprezentáció”) hívják. A BRep a CAD rendszerek legnépszerűbb modell-leíró eljárása, itt a felületeket NURBS-foltok összessége adja ki. CAM rendszerek virtuális megmunkáló moduljaiban is megtalálható a módszer, de a felületeket egyszerűbb módon, háromszögek halmazaként definiálják (4. ábra). Ha az anyag-megmunkálás szimuláció BRep alapú, a geometria tárolásához szükséges memóriaterület folyamatosan növekszik az idő előrehaladtával, mivel megmunkált felületet egyre több és több háromszöggel tudjuk leírni. Emellett a nagyobb mennyiségű adaton végzett műveletek száma miatt a szimuláció sebessége is egyre csökken. Ennek ellenére sok CAM rendszerben találkozhatunk a megoldással – ezekben a felbontás csökkentésével próbálják kiküszöbölni az említett problémákat.



4. ábra. Határfelület reprezentáció (BRep)

Áttekintve a fenti megoldásokat, a dexel-alapú eljárás implementálása mellett döntöttünk. Bár a módszer megfelelő a szabad formájú felületekkel takart testek leírására, az eltérő adat-reprezentációs modell miatt a hagyományos grafikus hardverek nem támogatják. Az egységesített architektúrájú grafikus egységek rugalmas adatkezelése viszont lehetővé teszi a hagyományostól eltérő struktúrájú adatelemek definiálását is. Bebizonyosodott, hogy ha a dexel-bázisú eljárás adatelemeit a grafikus egységek által megkövetelt formátumúvá alakítjuk, akkor megnyílik az út az új hardver kínálta nagyfokú párhuzamosítás kiaknázása felé.

### 3. A DEXEL-BÁZISÚ MEGMUNKÁLÁS-SZIMULÁCIÓ MEGVALÓSÍTÁSA GRAFIKUS HARDVEREN

A hagyományos, CPU-val végzett megmunkálás-szimulációnak a szekvenciális végrehajtáson kívül van egy másik hátránya is: a képernyőn való megjelenítés-

hez a grafikus hardver részére újra és újra el kell küldeni az aktualizált munkadarab geometriáját leíró teljes adathalmazt. Mivel ezt másodpercenként többször is meg kell tenni, a CPU és GPU (Graphics Processing Unit, vagyis a grafikus hardver) között folyamatosan óriási mennyiségű adat áramlik. Tudjuk, hogy az információk továbbításáért felelős adatvonalak sávszélessége véges – ez pedig jelentősen lelassíthatja az egész alkalmazás sebességét. A CPU – GPU közötti szűk keresztmetszet negatív hatásait úgy lehet kiszűrni, ha a munkadarabot leíró adatstruktúra létrehozását, tárolását és feldolgozását teljes egészében a grafikus hardver hatáskörében oldjuk meg.

A fenti folyamat első lépése az előgyártmány geometriájának dexelek formájában történő rögzítése. Szabad formájú testeket könnyedén hozhatunk létre különböző CAD rendszerekben, de ezek objektum-reprezentációja nem dixel-bázisú. Szerencsére akad egy köztes formátum, amelyet minden CAD alkalmazásból ki tudunk exportálni, dexelekké való alakítása pedig egyszerűen algoritmizálható: a gyors prototípusgyártásnál használt stl (stereolithography) fájl-típus. Egy stl fájl nem más, mint az objektum felületének háromszögekre való bontása (tesszelációja) során kapott elemi háromszögek felsorolása. Mivel a grafikus hardverek alapvetően háromszögekből felépített felületek megjelenítésére specializáltak, az stl fájlok feldolgozása nem jelent problémát. A dexelekké való alakítás módja tradicionális, de esetünkben shaderok végzik: a dexelek irányának megválasztása után egyszerre nagyszámú egyenes metszéspontja számítható a háromszögek alkotta felülettel. A párhuzamos számítások végzésére optimalizált hardver igen hatékonyan képes a feladatot elvégezni: a kutatáshoz használt középkategóriás grafikus kártya több mint 1 millió dexelt állított elő egyetlen másodperc alatt.

A dixel-bázisú anyageltávolítás-szimuláció során nagyszámú kivonás-művelet történik a dexelek és a vágószerszám között. Minden egyes szimulációs lépésben meg kell határozni a szerszám és az egyes dexelek metszéspontjait, s ennek alapján kell lerövidíteni vagy változtatlanul hagyni a dixel hosszát.

Az általunk kidolgozott módszer során shaderok végzik a kivonás-műveleteket, két lehetséges módon. Az első esetben analitikusan számolunk: a metszéspontokat vektor-egyenletek algebrai megoldásai adják, melyekben a dexelek mint térbeli egyenes szakaszok, a szerszám pedig mint térbeli felületek (gömbök és hengerek) összessége szerepel. A módszer nagyon gyors, de nyilvánvaló korlátokkal bír, mivel egy bonyolult szerszám vagy söprési térfogat analitikus leírása nagyon nehézkes. Mindazonáltal hatékonyan alkalmazható olyan egyszerű vágószerszámmal végzett szimulációkhoz, mint például a huzalelektrodás szikraforgácsolás.

A másik módszer szerint a dexelek és a szerszám héját leíró háromszög-halmaz metszéspontjait számítjuk ki a shaderok segítségével. (Mivel a szerszám kirajzolása-

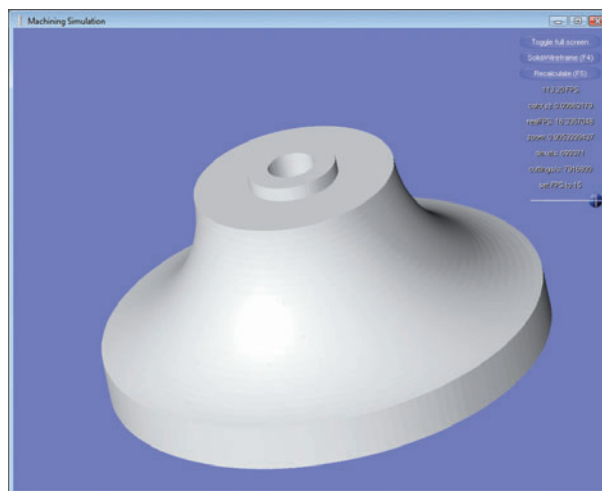
hoz eleve szükség van a felülete háromszög-alapú reprezentációjára, a szükséges adatok rendelkezésünkre állnak.) Az eljárás lehetővé teszi olyan, rendkívül bonyolult szerszámokkal végzett szimulációk elvégzését, mint a tetszőleges formájú elektródával végzett sülyesztékes szikraforgácsolás vagy fogaskerekek lefejtő marásáé.

A grafikus hardver alapú anyageltávolítás-szimuláció eljárás utolsó fázisa az aktualizált geometriájú munkadarab megjelenítése. Mivel a dexelek létrehozása és feldolgozása mellett azok tárolását is a grafikus egység végzi, nem kell igénybe vennünk a központi egység (CPU) és a grafikus hardver közötti szűk sávszélességű adatsatornát az információk eléréséhez. Ez jelentősen növeli a szimuláció sebességét, illetve az azonos sebesség mellett elérhető felbontást, a megjelenítés minőségét.

#### 4. EREDMÉNYEK

A kidolgozott eljárás demonstrálására elvégeztünk néhány jellegzetes anyageltávolítás-szimulációt az új módszer alapján. A többségük konkrét gépészeti feladatokhoz kötődik, de van közöttük tisztán bemutató jellegű is, fizikai alapok nélkül. Az alkalmazások elkészítésekor nem volt célunk a megmunkálási folyamat paramétereinek optimalizálása, sőt, néhány esetben túlzott minőségi követelményeket állítottunk fel az algoritmus hatékonyságának vizsgálatához. Az eredmények mozgókép formájában megtekinthetők a hivatkozások között feltüntetett weboldalon [12]. Az alábbiakban közülük kettőt részletezünk, a minőségre és gyorsaságra vonatkozó paraméterek felsorolásával.

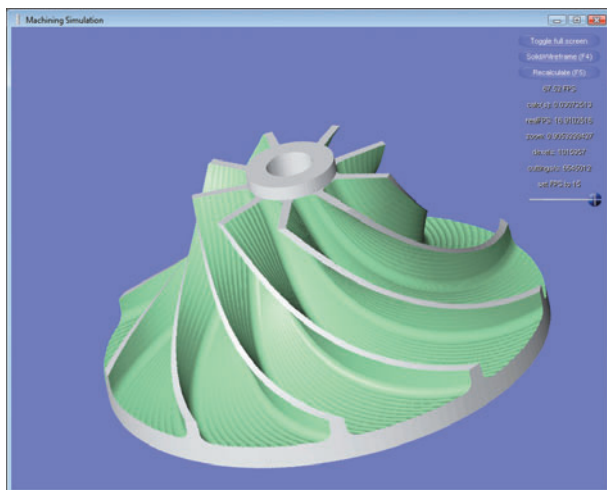
Az első példában a metszéspont-számítás analitikus elven történik. Az 5. ábrán látható előgyártmány-modell kb. 700 000 dixelből áll, ami 200 milliméter átmérőjű munkadarab esetén kb. 0,2 mm-es felbontást jelent. A vágószerszám gömb és henger uniójaként definiált.



5. ábra. Az előgyártmány modellje

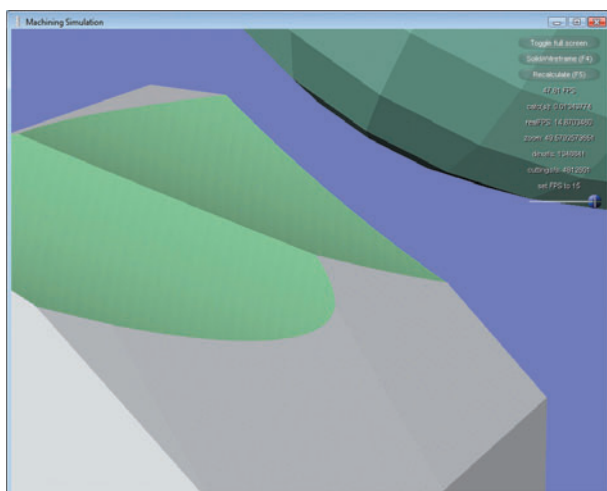


Kb. 210 000 szimulációs lépés után formálódott ki az 1 millió dexelből álló, durván megmunkált turbina-kerék (6. ábra). Az egy szimulációs lépésre jutó számítási idő 0,0065 másodpercről 0,0095 másodpercre nőtt a folyamat alatt, a dexelek számával egyenes arányban. Ez nagyjából 25 perc teljes megmunkálási időt jelent, ami lehetővé teszi a valós idejű nagy felbontású szimulációt.



6. ábra. A megmunkált turbina-kerék

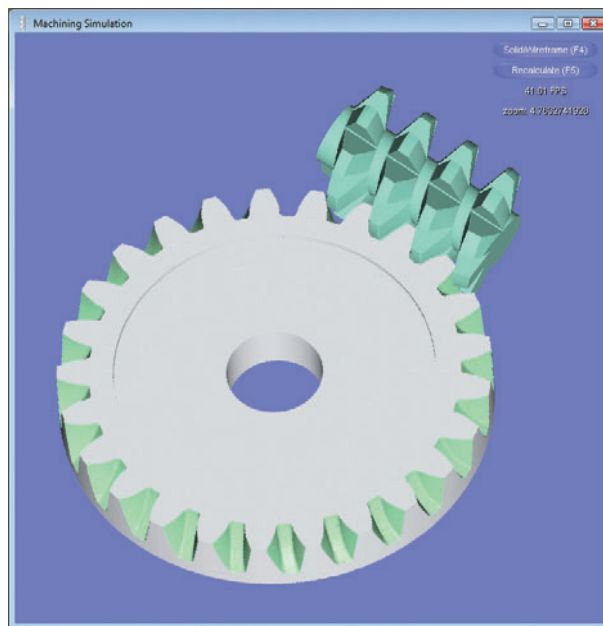
Az eljárás előnye, hogy a grafikus hardver alapú adatfeldolgozással igen gyors adatkonverziót érhetünk el, s ezáltal a munkadarab egy kisebb részlete az eredeti dexelsűrűséggel (tehát megnövelt felbontással) nagyon gyorsan újjáépíthető. A 7. ábrán 50-szeres nagyítás mellett láthatjuk a munkadarab egy részletét, kb. 0,004 mm-es felbontással. A konverzió csupán 0,65 másodpercet vett igénybe.



7. ábra. Munkadarab-részlet 50-szeres nagyítás mellett

A következő példa azt a módszert demonstrálja, amely során a dexelek és a vágószerszám metszéspont-

jaik közvetlenül a vágószerszám felületét leíró héj alapján származtatjuk, gyakorlatilag tetszőleges bonyolultságú szerszám definiálását lehetővé téve. A 8. ábrán látható lefejtő maró modellje tulajdonképpen túl is van részletezve, hiszen a szerszám egyszerűsített spirális burkolómodelljével is ugyanezt az eredményt érünk el –, a bonyolult modell csupán az eljárás hatékonyságának demonstrálására szolgál. 240 000 dexel mellett 0,02 másodperces ciklusidőt értünk el, ami valós idejű szimulációnak felel meg. Hasonló összetettségű szereszámmal mindeddig nem találkoztunk a hagyományos, CPU-alapú eljárások során.



8. ábra. Lefejtő marás szimulációja

## 5. ÖSSZEFOGLALÓ

Az egységesített architektúrájú grafikus hardverek megjelenésével a kis költségvetésű kutató vagy termelő egységekben is lehetővé vált nem grafikus jellegű, nagyfokú párhuzamosított végrehajtást igénylő algoritmusok hatékony végrehajtása. A Pécsi Tudományegyetemen folyó kutatás során az új technológia alkalmazhatóságának vizsgálatát, bevezetését tűztük ki olyan területeken, ahol mindeddig a hagyományos, szekvenciális módszerek uralkodtak. A szabad formájú munkadarabokat eredményező anyageltávolítás szimulációja esetén sikerült olyan eljárást kidolgoznunk, amellyel számottevő minőségi és teljesítménybeli javulás érhető el.

A kutatási projekt interneten publikált eredményei iránt élénk érdeklődés mutatkozik a vezető CAM rendszerfejlesztő cégek felől. Nem kétséges, hogy az olcsó, nagy teljesítményű eszközök használata néhány éven belül általános lesz a számítástechnika egészét tekintve, a játékfejlesztéstől kezdve a gépészeti szimulációs eljárás-

rásokig. Az anyageltávolítás-szimulációs algoritmusok programozását 2008 elején kezdtük el tanszékünkön –, az azóta eltelt idő alatt megduplázódott az azonos áron kapható grafikus hardverek teljesítménye. A technológia alkalmazása előbb-utóbb kikerülhetetlenné válik: a piacképesség megőrzése érdekében idehaza is mielőbb neki kell állni megszokott módszereink felülvizsgálatának, átdolgozásának.

### SUMMARY

With the appearance of the unified-architecture graphics hardware the effective execution of non-graphical, highly parallelized algorithms has become possible even in the low-budget researcher or manufacturer sections. The aim of the research work at the University of Pécs has been the examination of feasibility and applicability of the new technology in such fields where the traditional, sequential methods still rule. In case of the material simulation of free-form objects a new process has been developed, with which significant quality and performance improvement can be reached.

The publication of the project results on the internet has aroused the interest of the leader CAM developers. That is beyond question that the use of these cheap and high-performance devices will be common in the computer technology, from the game development to mechanical simulation processes. The programming of the material removal simulation started at the beginning of 2008 at our department – since that time the performance of the same-priced devices has doubled. The application of the technology is getting unavoidable sooner or later. For reserving the marketability, we have to start revising and reconstruct the traditional methods, here in Hungary as well.

### 6. IRODALOM

- [1] NVIDIA CUDA: Compute unified device architecture programming guide, NVIDIA Corporation, Version 1.1, 2007.
- [2] Intel Core i7 Performance Preview, [http://techgauge.com/article/intel\\_core\\_i7\\_performance\\_preview/9](http://techgauge.com/article/intel_core_i7_performance_preview/9), 2009.8.27.
- [3] AMD FireStream™ 9270, [http://ati.amd.com/technology/streamcomputing/product\\_firestream\\_9270.html](http://ati.amd.com/technology/streamcomputing/product_firestream_9270.html), 2009.8.27.
- [4] MICHALAKES J., VACHHARAJANI M.: GPU Acceleration of numerical weather prediction, submitted to 2008 Workshop on Large-Scale Parallel Processing (LSPP), April 2008., [www.mmm.ucar.edu/wrf/WG2/michalakes\\_lspp.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/WG2/michalakes_lspp.pdf)
- [5] LIU W., SCHMIDT B., VOSS G., MÜLLER-WITTIG W.: Molecular dynamics simulations on commodity GPUs with CUDA, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4873/2007, pp. 185–196.
- [6] MANAVSKI S. A.: CUDA compatible GPU as an efficient hardware accelerator for AES cryptography, Proc. of IEEE International Conference on Signal Processing and Communication, ICSPC 2007, pp.65-68
- [7] NVIDIA CUDA Zone, [http://www.nvidia.com/object/cuda\\_home.html](http://www.nvidia.com/object/cuda_home.html), 2009.8.27.
- [8] TUKORA B., SZALAY T.: Manufacturing simulation in the light of the recent GPU architectures. Proceedings of Gépészet Konferencia (electronical issue): C20
- [9] KARUNAKARAN K.P., SHRINGI R., SINGH A.K.: Virtual machining. 2004. Industry watch 6: 62-68.
- [10] SAITO T., TAKAHASHI T.: NC machining with G-buffer method. 1991. ACM SIGGRAPH Computer Graphics 25(4): 207-216.
- [11] HOOK T. VAN.: Real time shaded NC milling display. 1986. Computer Graphics 20(4): 15-20.
- [12] Machining simulation with GPGPU, [www.youtube.com/user/BalazsTukora#grid/user/08EDE041E671ECD7](http://www.youtube.com/user/BalazsTukora#grid/user/08EDE041E671ECD7), 2010.6.1

# A PAKSI ATOMERŐMŰBEN

Az atomenergetikával kapcsolatos tudományos kutatással és kísérleti fejlesztéssel kapcsolatban az 1996. évi CXVI. Törvény az atomenergiáról a 4. paragrafusában fogalmaz meg előírásokat. A törvény 4. § alapján az atomenergia biztonságos alkalmazását a tudomány és a technika fejlesztésével, a kutatómunka összehangolt szervezésével, a hazai, illetve a nemzetközi tudományos kutatások eredményeinek gyakorlati alkalmazásával, valamint szakemberek képzésével, továbbképzésével kell elősegíteni. A nukleáris létesítmény biztonságának növeléséhez szükséges kutatási-fejlesztési tevékenység költségei az engedélyest terhelik.

A törvényi előírások megvalósulását a Nukleáris Biztonsági Szabályzatok konkrétabb elvárások megfogalmazásával biztosítja. Így előírták az új adatok, tudományos eredmények folyamatos értékelését és hasznosítását a létesítmény teljes élettartama alatt. Valamint azt, hogy az üzemeltető szervezetnek kölcsönösen megfelelő kapcsolatokat kell létesítenie és fenntartania a hazai és nemzetközi tudományos és kutató intézetekkel, az atomenergia alkalmazásában érdekelt egyéb szervezetekkel a korszerű tudományos és technikai ismeretek felhasználása érdekében.

Az atomerőmű által koordinált és végrehajtott kutatás-fejlesztési, valamint innovációs tevékenység eredményessége nem független a hazai nukleáris-kutatás fejlesztési környezetétől. A magyar atomenergetikai kutatásoknak számos, nemzetközi szinten is nyilvánított eredménye van. A hazai nukleáris kutatás-fejlesztési tevékenység szorosan kapcsolódik a paksi atomerőmű biztonságos üzemeltetéséhez és az atomenergetika jövőbeni, további felhasználásának megalapozásához.

Az atomerőmű szervezeti rendszere megfelelően biztosítja ezeknek a tevékenységeknek az ellátását és az atomerőmű tulajdonosa a kutatás-fejlesztési és innovációs feladatok finanszírozását azok jelentőségének megfelelően kiemelten biztosítja.

Az elmúlt időszakban a társaság alkalmazott kutatás és kísérleti fejlesztési tevékenységért 2000-től jelenleg is a fejlesztési és elemzési osztály a felelős. E szervezet – egyéb műszaki feladatai mellett – társasági szinten koordinálja a kutatási-fejlesztési és innovációs tevékenységet, illetve tartja a kutatások szervezésben érdekelt országos főhatóságokkal, intézményekkel, fejlesztői műhelyekkel a kapcsolatot, figyeli a világban végbemenő tendenciákat. Az egyes végrehajtott kutatás-fejlesztési feladatok





szakmai specifikálása, a folyamat szakmai ellenőrzése és a konkrét hasznosítás az atomerőmű szakmai igazgatóságai, illetve egy-egy konkrét innováció bevezetésére szerveződő projektek mentén részben decentralizált, de a fejlesztési és elemzési osztály a koordináció mellett a gazdálkodás, a prioritások kitzúzése és a bizonyos esetekben a tematika tekintetében is felügyeletet gyakorol a társaság kutatás-fejlesztési és innovációs tevékenysége felett. A nemzetközi kutatási eredményeket egyrészt az ún. főkonzulensi kapcsolaton keresztül, másrészt bizonyos nemzetközi kutatási projekteken szakértői vagy tanácsadói szinten történő közvetlen részvétel útján ismeri meg az atomerőmű.

A nukleáris kutatás-fejlesztési tevékenység volume-ne, színvonala, az országos kutatás-fejlesztési háttér kihasználása az atomerőmű eddigi élettartama során meghaladta az országos átlagot, áttételesen jelentősen hozzájárult az erőműben kialakult műszaki és biztonsági kultúrához, az élenjáró üzemi mutatókhoz. A társaság kutatás-fejlesztési tevékenysége szorosan integrálódott az országos és nemzetközi programokba és projektekbe.

Az atomerőmű által koordinált kutatási és fejlesztési tevékenység egy olyan módszeresen folytatott alkotómunka, amely a meglévő ismeretanyag bővítésére, valamint arra szolgál, hogy ezt az ismeretanyagot új alkalmazások kidolgozására használják fel. A paksi atomerőműben a kutatás-fejlesztési tevékenység keretében elsősorban a műszaki alkalmazott kutatás, kísérleti fejlesztés és bizonyos esetekben (célzott) alapvető tevékenységek végezhetőek.

A kutatás-fejlesztési eredmények jelentős része hasznosul az erőmű biztonságát értékelő dokumentumokban, hatósági beadványokban, a biztonságot vagy a hatékonyságot növelő átalakítások kezdeményezésében, azok műszaki biztonsági megalapozásában, a különböző üzemeltetési, ellenőrzési vagy technológiai utasításokban.

A nemzetközi kutatási eredményeket az atomerőmű az egyes kutatási projekteken való közvetlen aktív részvételével vagy a főkonzulensi kapcsolaton keresztül a partnerintézetek részvételével ismeri meg és hasznosítja.

Az atomerőmű által is kezdeményezett nukleáris kutató-fejlesztő tevékenységgel több hazai intézmény is foglalkozik, közülük legnagyobb az MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet (AEKI), ahol közel száz kutató tevékenykedik. A paksi atomerőmű főkonzulenseként is működő AEKI alaptevékenységének gerincét a reaktorbiztonsági kutatások jelentik, amelyek részben az üzemelők blokkokra, részben új típusú blokkokra irányulnak. Az intézetben folyó kísérleti munka kiterjed a reaktoranyagok, a fűtőelemek és a reaktorban végbemenő termohidraulikai folyamatok vizsgálatára normál üzemi, és üzemzavari körülmények között, reaktorkémiai és sugárvédelmi mérésekre, valamint környezeti hatások elemzésére. Az intézet által működtetett kutatóreaktor köré települt berendezések számos különleges kutatási lehetőséget biztosítanak. Az AEKI-ben kifejlesztett

és használt számítógépes modellek lehetővé teszik az atomreaktorok aktív zónájának csatolt neutronfizikai számítását, a termohidraulikai folyamatok korszerű leírását, az atomerőművi blokkok biztonsági elemzéseinek végrehajtását, az ember-gép kapcsolat tökéletesítését és atomerőművi szimulációs szoftverek létrehozását, teljes léptékű blokk-szimulátor továbbfejlesztését.

A második legnagyobb atomerőműves kapacitással rendelkező kutatóintézet a Nukleáris Biztonsági Kutatóintézet Kft. (NUBIKI). Az intézetben valószínűségi, rendszertechnikai és folyamatszimulációs elemzéseket hajtanak végre a paksi atomerőmű biztonságnövelő intézkedéseinek megalapozásához. Számítógépes kódok segítségével súlyos baleseti folyamatokat modelleznek a balesetkezelési stratégiák kidolgozásához. A NUBIKI-ben foglalkoznak a paksi konténment modellezésével és vizsgálatával.

A hazai oktatási intézmények közül a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézetében (BME NTI) folyik a legsokoldalúbb atomenergetikai kutatás. A BME NTI kutatási tevékenysége az Oktatóreaktor, mint főberendezés köré csoportosul. Az intézetben akkreditált radiokémiai laboratórium működik. Sugárvédelmi kutatások és nukleáris mérés-technikai fejlesztések folynak, és foglalkoznak a nukleáris energiarendszerek és a nukleáris üzemanyagciklus elméleti vizsgálatával is. Korszerű numerikus módszerekkel reaktor- és neutronfizikai, valamint termohidraulikai elemzéseket hajtanak végre, szoftverszimulátorokat fejlesztenek az atomerőmű személyzetének alapszintű oktatásához.

A nukleáris kutatás néhány speciális és fontos területén az Országos „Frédéric Joliot-Curie” Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutatóintézet (OSSKI), az MTA Atommagkutató Intézet (ATOMKI), az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet (RMKI), az MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (SZTAKI) és az MTA Izotópkutató Intézet kutatói dolgoznak. A paksi atomerőmű biztonságos üzemeltetéséhez kapcsolódó kutató-fejlesztő munkában részt vesznek a veszprémi Pannon Egyetem, a Miskolci Egyetem és a Pécsi Tudományegyetem oktatói is.

A hazai nukleáris kutatás-fejlesztés finanszírozásának több forrása van. Az MTA költségvetési támogatásával akadémiai kutatóintézetek kapnak lehetőséget nukleáris témák kutatására. Az Országos Atomenergia Hivatal (OAH) az atomenergia békés célú hazai alkalmazásának biztonságával összefüggő kutatási-fejlesztési tevékenységekre és a hatósági ellenőrzést szolgáló megalapozó műszaki tevékenységekre ad támogatást pályázatok keretében számos intézménynek. A Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal (NKTH) által korábban meghirdetett Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Programok (NKFP) és a Gazdasági Versenyképesség Operatív Program (GVOP) támogatásával több jelentős hazai nukleáris kutatási-fejlesztési program indult el. Az Európai Unió (EU) néhány évvel ezelőtt jelentős támogatást adott az

atomerőművek biztonságos üzemeltetéséhez kapcsolódó kutatásokra a volt szocialista országoknak PHARE és TACIS programok keretében. A magyar intézmények már az ország uniós taggá válása előtt részt vehettek az európai kutatási keretprogramokban. A jelenleg futó EU 7. Keretprogram csak minimális finanszírozást irányzott elő a maghasadásos energiatermeléshez kapcsolódó kutatásokra, ennek eredményeként számottevően csökkent a hazai kutatások közvetlen EU-forrásból származó támogatása. A Paksi Atomerőmű Zrt. kutatás-fejlesztési szerződések formájában komoly összeget fordít az erőmű biztonságos üzemeltetéséhez, fejlesztéséhez kapcsolódó kutatásokra. A Paksi Atomerőmű Zrt. főkonzulensi megbízása alapján az AEKI és a NUBIKI közösen vesz részt az erőmű stratégiai döntéseinek előkészítésében. Ezen túl az atomerőmű számos esetben biztosítja a nemzetközi kutatás-fejlesztési projekteket részvevő hazai intézetek önrészét vagy a projekt tagdíját. Ilyen esetekben a projektben részt vevő intézmények valamint az atomerőmű is hozzájutnak a projektek keretében született eredményekhez, illetve befolyásolni tudják a tervezett kísérleteket vagy a modellfejlesztések irányát.

Az éves kutatás-fejlesztési tervek szerint 1995-től napjainkig több, mint 350 kutatási-fejlesztési szerződést kötött a társaságunk különféle források terhére, folyó árakon összegezve, a még folyamatban lévő témákat is tekintve körülbelül legalább 5 Mrd Ft összértékben.

A közelmúlt kutatás-fejlesztési ráfordításainak növekedésére jótékony hatással volt az a törvényi előírás, amely szerint a gazdálkodó szervezetek innovációs járulék befizetési kötelezettsége csökkenthető az állami költségvetési keretekben gazdálkodó kutató intézetektől és egyetemi tanszékektől megrendelt kutatási feladatok költségeivel. Ezzel összefüggésben az atomerőmű közreműködött több egyetemen kialakuló Kooperációs Kutatási Központok létrehozásában.

A korábbi évekhez képest jelentősen megnőtt az akadémiai kutatóintézetek és az egyetemi tanszékek szerepe az atomerőmű által finanszírozott kutatás-fejlesztési tevékenységekben. Ez a tendencia tovább erősödött az innovációs járulék leírési lehetőségének bevezetését követő években.

Az atomerőmű érdekelt abban, hogy az energetikai és ezen belül a nukleáris területen általában is, de a kutatás fejlesztési vagy innovációs tevékenységéhez kiemelten, megfelelő szakember utánpótlás álljon rendelkezésére. A műszaki egyetemekkel a kutatás-fejlesztés területén végzett együttműködés érezhető módon járul hozzá a viszonylag kisebb hallgatói létszámot foglalkoztató szakok működési feltételeinek fenntartásához. Emellett az atomerőmű olyan stratégiai együttműködést célzó,

hosszú távú megállapodásokat köt elsősorban műszaki egyetemekkel, amely elősegíti a hallgatók érdeklődésének felkeltését a biztonságos és környezetkímélő energiatermelési technológiák, ezen belül az atomerőmű működésének, technológiájának megismerése iránt. Az együttműködés formái sokrétűek, például a BME hallgatói közül évente közel száz hallgató vesz részt az erőműben szakmai gyakorlaton, szinte mindennaposak a rövid szakmai látogatások, az egyetemekkel és a hallgatói önkormányzatokkal közösen szervezett rendezvények pedig kiváló fórumai a szakmai kapcsolatok kialakításának. Emellett az atomerőmű a saját dolgozói képzésére használt egyedülálló oktatási infrastruktúra, mint például az atomerőművi szimulátor, vagy a valódi atomerőművi nagyberendezésekkel felszerelt Karbantartó Gyakorló Központ rendelkezésre áll egyetemi partnereink számára elméleti és gyakorlati képzések helyszínéül egyaránt.

A kutatás-fejlesztési tevékenység szerteágazó tematikáját jól illusztrálja az alábbi táblázat, amely az elmúlt tíz évben lezárt 161 témát próbálta meg elég szélesen, 18 nagyobb témakör szerint csoportosítani.

A kutatás-fejlesztési feladatok tematikus gyakorisága csökkenő sorrendben

TÉMAKÖR	MUNKA
biztonsági elemzés	31
anyagvizsgálat, tömörségvizsgálat	25
reaktorfizika, üzemanyag viselkedés	14
sugárvédelem, katasztrófa elhárítás	11
dekontaminálás, felülettisztítás	11
öregedéskezelés	11
vízvegyészet	10
karbantartás, célgépek	9
radioaktív hulladék kezelése	8
teljesítménynövelés	8
oktatás- és szimulátor fejlesztés	5
üzemvitel és energetika általában	5
építészet	3
radiokémia	2
környezetvédelem	3
balesetkezelés	2
diagnosztika, szoftver	2
egészségügy	1

Látható, hogy a kapott tematikus gyakorisági lista élén fontos, biztonsághoz általában kapcsolódó szakterületek állnak. E területeken a gyors fejlődés volt jellemző, technológiák és eszközök terén egyaránt. Az utóbbi években jelentkezett új kutatási témák között ki kell emelni az öregedéskezelés, a teljesítménynövelés, az üzemanyagviselkedés, valamint a balesetkezelés témaköreit.



**Silójárművek építőanyagipari, élelmiszeripari, mezőgazdasági, vegyipari, por- és granulált áruk, takarmányok, veszélyes anyagok szállítására.**

Az ömlesztett áruk, porok, granulátumok vagy vegyipari normál és veszélyes anyagok szállítására kialakított alumínium tartálykocsik típusától függően részben hazai tervezéssel, egyes főegységek vonatkozásában pécsi gyártással készülnek. A Németországból származó alumínium táblákból plazmavágók, élhajlító gépek és lemezhengerek segítségével történik az alkatrészek előmegmunkálása, majd kézi és félautomatikus AWI-AFI eljárásokkal önördő (futómű felfogást is tartalmazó), hegesztett tartálykonstrukció kerül kialakításra. Az alumínium felületek a bevonatrendszer jó tapadása érdekében pácolásra kerülnek, majd ezután következnek a futóművek, komplett fékrendszer és elektromos kábelezés szerelési munkálatai. A 90%-os készültségi fokig Pécssett gyártott járművek festése és végszerelése, valamint ellenőrző vizsgálati (nyomástartó edény végső vizsgálat, forgalomba helyezéshez szükséges TÜV vizsga, stb.) is Németországban történnek.

#### **Tartályos nyerges félpótkocsik (SF)**

A tartálykocsik nyerges vontatóhoz kap-

csolódva elsősorban poranyagok (építőipari, élelmiszeripari, mezőgazdasági termékek) szállítására alkalmasak. A megrendelő egyedi igényei szerint – akár 2-5 1eeresztőkúpos és 2-8 kamrás, osztott vagy vegyes változatban is, 20-62 m<sup>3</sup> hasznos űrtartalommal – Pécssett tervezik meg a tartálykocsit, amelyek az egyedi igényektől, típustól és rendelési állománytól függően 8-12 hét alatt legyártásra kerülnek, elkészülnek. A tartálykocsik nem billenthetőek, töltésük a búvónyílásokon felülről, illetve betápcsövön történik. A lefejtőkúpok alul vannak, az ürítővezetéknel oldalsó vagy hátsó kivezetésre is lehetőség van. A lefejtés könnyebbé tételére az ürítő levegő mellett a kifolyókúp textiltbetétjén max. 2 bar nyomáson ún. lazító levegőt fújnak át, amely megakadályozza a boltozódást, fellazítja a lerakódott anyagot.

#### **Billenthető tartályos félpótkocsik (SK)**

A billenthető félpótkocsik is nyerges vontatóhoz kapcsolódnak, de már jóval nagyobb térfogatméretben készülnek (40-89m<sup>3</sup>). Általában nagy térfogatú, kis fajsúlyú anyagok (műanyag-granulátumok, fűrészpor, maláta, cukor stb.) szállítására alkalmazzák. Hosszuk elérheti a 13,5 métert. Vákuum (felszívásra alkalmas), illetve veszélyes anyagok szállításához ADR-s változatban is készülnek.

#### **Alvázis silőfelépítmények (API), pótkocsik (SAPI, ZA), konténerek (CK)**

A tartályos gépjárművek fixen, az alvázra szerelt 24 és 31 m<sup>3</sup>-es változatban készülnek, elsősorban az élelmiszeripar és a mezőgazdaság számára. Ezekhez a járművekhez kapcsolható egy 18-33 m<sup>3</sup>-es tartályos pótkocsi is. A cég emellett készíti konténertartályokat is, amelyek rendkívül praktikusak, mivel ezek adják a szabvány konténer méretben elférő legnagyobb hengereket. Konténer szállító félpótkocsira, vasútra, hajóra is felrakható, méretük 20 láb/26 m<sup>3</sup>, 30 láb/41 m<sup>3</sup>, 40 láb/56 m<sup>3</sup>.

A pécsi gyárból évente mintegy 300-400db tartályegység kerül ki, melyek döntő részben Nyugat-Európa piacán találunk gazdára. Magyar megrendelés esetén a Spitzer Silo Pécs Kft. a kereskedelmi tevékenysége keretében közreműködik a tartálykocsik behozatalában (illetve a pécsi gyártásnál a visszahozatalban), és a magyar hatósági vizsgák (nyomástartó edény üzembehelyezés, műszaki vizsga, élelmiszeripari minősítés, stb.) gyors és szak-szerű lebonyolításában.

Cím: H-7634 Pécs, Szentlőrinci út 15.

Levelezési cím: H-7615 Pécs, Pf. 33.

e-mail: [pecs@spitzer-silo.hu](mailto:pecs@spitzer-silo.hu)

[www.spitzer-silo.hu](http://www.spitzer-silo.hu)

Tel.: +36 72/552-380 Fax: +36 72/552-399

# Folyamatos innováció, fejlesztő csapatot épít a VIDEOTON Elektro-PLAST Kft.

Somogy megye és Kaposvár egyik legnagyobb és legjelentősebb termelő üzeme, a folyamatos innovációt a zászlajára tűző és minden energiájával ezért is dolgozó VIDEOTON Elektro-PLAST Kft. Gyárunk az Egyesült Izzó és Villamossági Rt-ből kinőve és továbbfejlődve, 1997-ben került a VIDEOTON csoporthoz. A cég elődjénél már a 70-es években is komoly fejlesztőcsapat dolgozott. Munkájukat szabadalmak sora fémjelzi.

Tevékenységünk alapvetően az integrált gyártási szolgáltatásokra épül. A termelés egyik iránya a hőre lágyuló műanyagok fröccsöntése és a gyártásukhoz szükséges szerszámogatás. A műanyag alkatrészek végszerelése is túlnyomórészt helyben történik. Mintegy 500 szerszámmal, 750 különféle műanyag alkatrészt gyártunk. Fröccsöntő gépeink záróereje 35-600 tonna közötti teljesítményre képes. Gépeink jelentős része ma már robotizált.

A gyárunkban folyó termelés másik nagy ága - a ma már egyre inkább a fejlesztési feladatokban való részvétellel együtt megvalósuló - gépek, eszközök, berendezések szerelése és előállítás. Automatizált és kézi gyártósorokon konyhai robotgépeket, borotvatöltő- és tisztító berendezéseket, vasalókat, porszívókat, mixereket, citromfacsarókat, digitális mérlegeket, valamint wellness termékeket szerelünk. Az új termékek kifejlesztésén és gyártásuk elindításán mérnökeink, fejlesztő csoportunk ma már együtt dolgozik a megbízóinkkal. A bemutatott termelő tevékenységeinket a beszerzéstől a kiszállításig terjedő integrált gyártási szolgáltatásaink egészítik ki.

A verseny a piaconmaradásért, új piacok meghódításáért, továbbá azért, hogy a világcégek elismert és megbecsült partnerei maradhassunk, megköveteli a folyamatos innovációt, a kreatív, a rugalmasan reagáló szakember gárdát. A több éves erőfeszítés, a folyamatos képzés és fejlődés eredménye, hogy ma már termékfejlesztő csapatunk a cég világhírű megrendelőivel együtt fejleszti a gyártmányokat, együtt alakítja ki az új műszaki megoldásokat. Mérnökeink dolgozzák ki az előzetes gyárthatósági analízist, műanyag alkatrészeket terveznek. Már ebben a fázisban figyelembe vesszük a szerszámozhatósági, a tartóssági, a funkcionális és az ergonómiai szempontokat. A fejlesztő csoport javaslatokat tesz a konstrukciós változtatásokra, véleményezi a vevői fejlesztéseket, 3D modelleket és 2D rajzokat készít. Az a cél vezéri a csapatot, hogy - a vevőtől kapott design alapján - komplett fejlesztést, szerszámozást, beszállító keresést és gyártásindítást valósítson meg- teljes logisztikai és átfogó minőségirányítási, valamint dokumentációs háttérrel.

A közelmúltban a formatervezés területén a Budapesti Műszaki Egyetemmel is megkezdődött az együttműködésünk. Innovációs munkánkban mindenkor támaszkodhatunk anyacégünk, a székesfehérvári VIDEOTON teljes fejlesztő csapatára.

Legalább ennyire fontos a gyártásfejlesztési csoportunk munkája is. Tevékenységét a gyártáshoz szükséges célgépek tervezése, továbbá a legyártásuk, vagy éppen a legyártatásuk jellemzi. A különféle vevőknek a számos termékhez készített tartós tesztereket egy külön elektromos tesztlaborban használjuk, ahol 24 órás vizsgálatokat végzünk a sajátfejlesztésű termékeinken.

A gyártmány- és a gyártásfejlesztő csoportunk a multinacionális vevőknél jelenleg rendszerített tervezőszoftvereket használja ( NX, ProEngineer, Solid Edge). Vállalatunk a fiatal és korszerű nyelvtudással rendelkező mérnökcsapatot folyamatos szakirányú képzéseken fejleszti. Mottónk és jelszavunk: ami ma még elég, az holnap már kevés.



# VIDEOTON

Elektro-PLAST Kft.

2009-2010  
Műanyag Érték  
Díjazott 2010

**Szerszámkompetencia  
Műanyagfröccsöntés  
Összeszerelés  
Ipari park szolgáltatások**

**Innovatív gyártások  
Komplex szolgáltatások  
Európa és a világ számára**

**Legyen Ön is munkatársunk!  
Új termékek tervezéséhez  
gépész- és villamosmérnökök jelentkezését várjuk!  
Osztozzunk együtt egy nagy múltú magyar cég sikerében!**



VIDEOTON Elektro-PLAST Kft  
7400 Kaposvár, Izzó u. 3.  
Tel.: +36 82 502 100; Fax: +36 82 502 190

[www.vtep.videoton.hu](http://www.vtep.videoton.hu)  
[vtep@vtep.videoton.hu](mailto:vtep@vtep.videoton.hu)



**SOM**  
**SYSTEM**  
mérnöki iroda

2040 Budaörs  
Szabadság út 193.  
Tel.: (23) 444-770

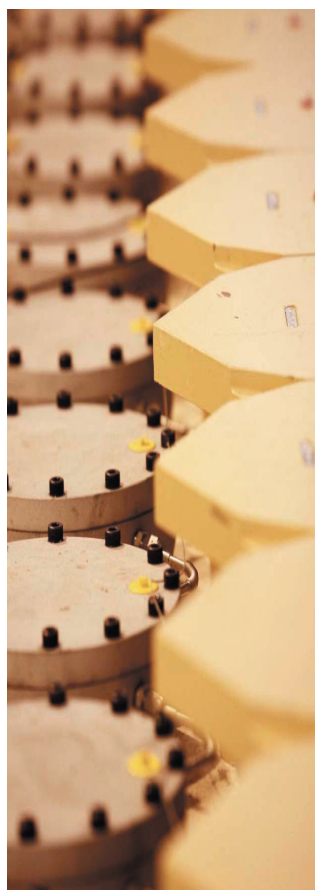
## **SOM SYSTEM Kft.**

mérnökszolgálat a  
nukleáris energetikában

A Paksi Atomerőmű Zrt.  
kiemelt szállítója

---

A Radioaktív Hulladékokat Kezelő  
Közhasznú Nonprofit Kft.  
üzemelő létesítményeinek  
generáltervezője



# CONTENTS

1. Katona T.; Rátkai S.; Jánosiné Bíró Á.:  
**Extension of operational lifetime of WWER-440/213 type units at Paks NPP TYPE UNITS AT PAKS NPP .....3**  
*Key elements of justification and measures ensuring the safety of long-term operation of Paks NPP WWER-440/213 units are identified and discussed in the paper. These are the assessment of plant condition and review of adequacy of ageing management programmes, also the review, validation and reconstitution of time limited ageing analyses as core tasks of license renewal.*
2. Magyar Z.; Baumann M.:  
**Possibilities of energy efficient renewing of residential buildings (ECOLISH Project) .....12**  
*The energy use of the residential buildings in EU is 40-42 % of the total energy consumption. The ECOLISH project realized with the financial support of the EU's 'Intelligent Europe' program aims at the energy savings in different regions of EU with the same low income level.*
3. Meiszterics Z.:  
**Welding of nitinol wire and titanium tip .....17**  
*Based on two student diploma works author presents the resolution process of a microwelding task involves the joining of a Ø1,4 mm Nitinol (Ti-Al-V alloy) wire and a Ø3 mm titanium tip for medical purposes. Due to the difficulties connected to the laser microwelding finally the resistance welding was preferred.*
4. Perjési-Hámori I.:  
**The analytical and numerical solution of two dimensional heat conduction problems in case of special boundary conditions .....23**  
*The engineers defined heat conduction problems issue in hardly treatable partial differential equation. With help of computer algebra systems the solutions of these equation become easier and the solutions are understandable of those persons, having no enough routine in solution of differential equations.*
5. Stampfer M.:  
**Definition the number of stages by gear units .....28**  
*In the early stage of designing gear units, one must make a decision about the number of stages of the wanted speed ratio. Up to the present the decision was made on experience. In this paper author presents a new mathematical method by which the optimum value of the number of stages can be determined.*
6. Tukora B.; Szalay T.:  
**Involving of new-generation graphics hardware into machining simulation processes .....35**  
*The main advantages of general-purpose (i.e. non-graphical) usage of the new-generation graphics hardware appear at the execution of highly parallelised processes. In this article the applicability of the new method is shown by the example of the material removal simulation of free-form objects.*

# GÉP

## INFORMATIVE JOURNAL

for Technics, Enterprises, Investments, Sales, Research-Development, Market of the Scientific Society of Mechanical Engineering

Dr. Döbröczöni Ádám

**President of Editorial Board**

Dr. Kálmán András

**General Editor**

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

**Deputy**

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Jármái Károly

Kármán Antal

Dr. Kulcsár Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálkás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Rittinger János

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

Cooperation in the editing:

Dr. Orbán Ferenc

**Dear Reader,**



The Pollack Mihály Faculty of Engineering has been established 40 years ago. In that time it was a separate institute as a college. Lecturers of this new college had been recruited from two earlier existing high technical schools' staff.

We got the honour of being the editor of this issue since Pécs is the capital of Culture in 2010 June 14.

In 1970 when the college had been established, two faculties were functioning: Civil

engineering and Mechanical engineering.

Now both of the educational offers and faculty's constitutional form have changed a lot.

In 1995 Pollack Mihály College of engineering was phased out as an independent institution and as the part of the former University of Janus Pannonius became a separate faculty.

Meanwhile some more university degree education could be launched such as architect, architecture-engineer, and urbanistics. This way our college has been transformed into a university faculty.

Since 2003 doctoral studies' school is operating, that has been changed nowadays and was accredited as Marcell Breuer PhD school at the beginning of this year in which DLA of artistic architecture and PhD of architectural engineering can be obtained.

Due to its location the faculty has become the technological centre of the region. Companies, factories working in the region are often appeal to us for solving their technical problems and these are where most of our students can find a job.

The faculty consists of four independent institutions and two independent departments.

Four articles published in this journal were written by lecturers of Mechanical Engineering Institution, other two by teachers of Department of Informatics and one is from Department of Mathematics.

On the front cover of the journal the renovated building of Pollack Mihály Faculty of Engineering can be seen, that gained a Construction industry award in 2009.

Pécs, May 2010

Dr. Bachmann Bálint

Dean

Managing Editor: Dr. Kálmán András. Editor's address: 3529 Miskolc, Budai József u. 46.  
Postage-address: 3501. Pf. 55. Phone/fax: (46) 325-504, 20/9358-812. E-mail: kaetsa@axelero.hu  
Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1027 Budapest, Fő u. 68.

Postage-address: 1371, Bp, Pf. 433

Phone: 202-0656, Fax: 202-0252, E-mail: ficze.gte@mtesz.hu, Internet: www.gte.mtesz.hu  
<http://members.chello.hu/cocom/gep/gep-index.htm>

Responsible Publisher: DR. IGAZ JENŐ Managing Director

Printed by Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Managing Director: Vesza József

Price per month: 900 Ft; Subscriptions 2.700 Ft per a quarter, 5.400 Ft per an half a year, 10.800 Ft per year.

Distribution in foreign countries by Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat H-1389  
Budapest, Pf. 149. and Magyar Média H-1392 Budapest, Pf. 272.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

**All articles are peer reviewed.**

A **távhőszolgáltatás** a városi hőellátás **ideális megoldása**. A helyi tüzelésekkel működő rendszerekkel szemben **számtalan előnye van**, amelyek közül kiemelendő **környezetkímélő jellege**, és az igénybevevőinek **nyújtott kényelem**.

[www.petav.hu](http://www.petav.hu)



Környezetbarát  
**energia**



