

Az ALLEGRO fűtőelem-viselkedési számítások előkészítése

Gadó János

MTA Energiatudományi Kutatóközpont

1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út. 29-33.

Az MTA EK és az AEMI a FUROM és a FRAPTRAN kódokat használja sztenderd fűtőelem-viselkedési modellként a kvázi-stacionárius, illetve a tranziens számításokhoz. Ezeket a kódokat vízű termikus reaktorok cirkónium burkolatú fűtőelemeihez fejlesztették ki. Az ALLEGRO projekt számára, amely egy gázűtésű gyorsreaktort kíván kifejleszteni acélburkolatú fűtőelemekkel, a FUROM és a FRAPTRAN megfelelő verzióit kell kifejleszteni. Ez az anyagi adatok és több esetben a folyamatok modellezésének megváltoztatását igényli. A jelentésben összegyűjtöttük a nyilvános irodalomból elérhető anyagi adatokat és ajánlásokat adtunk a leginkább használandó adatok használatára. Ezt a munkát a megfelelő kódverziók kidolgozása fogja követni.

Bevezetés

A cikk bevezetőjében azt igyekszünk tisztázni, hogy egyfelől mi is az az ALLEGRO projekt, másfelől milyen célból és milyen módszerekkel készülnek a fűtőelem-viselkedési számítások.

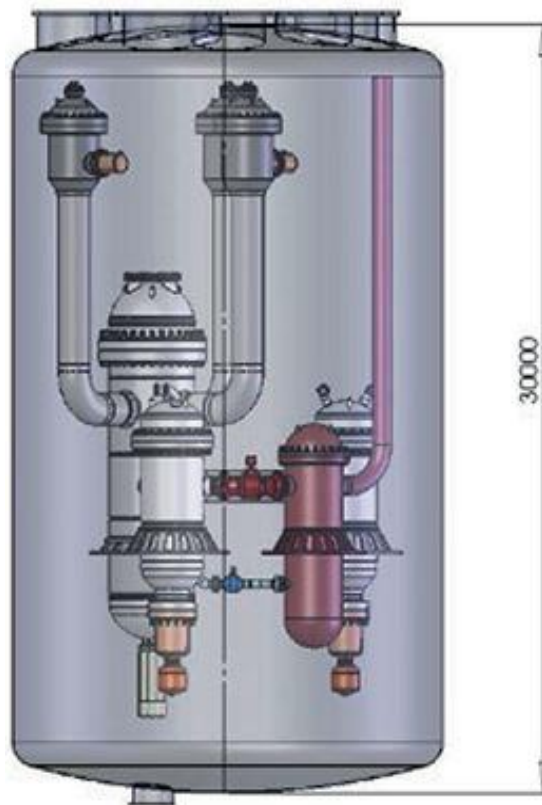
Az ALLEGRO reaktor

Az ALLEGRO reaktor egy tervezett magas hőmérsékletű gázűtésű gyorsreaktor (GFR), a maga nemében első a világon. A reaktor feladata a GFR technológia működőképességének demonstrálása, továbbá a GFR fűtőelemek minősítése. Az ALLEGRO reaktor a Visegrádi Négyek valamelyik tagországában (valószínűleg Szlovákiában) épül majd fel. A Visegrádi Négyek tagországainak nukleáris kutatóintézetei (magyar részről az MTA Energiatudományi Kutatóközpont - MTA EK) és partnereik (magyar részről a BME Nukleáris Technikai Intézet, a NUBIKI Nukleáris Biztonsági Kutatóintézet Kft. és az AEMI Atomenergia Mérnökiroda Kft.) 2010 óta együttműködnek egymással és a francia CEA-val, hogy előkészítsék az ALLEGRO létesítését. Az együttműködés jogi keretét a V4G4 Kiválósági Központ adja.

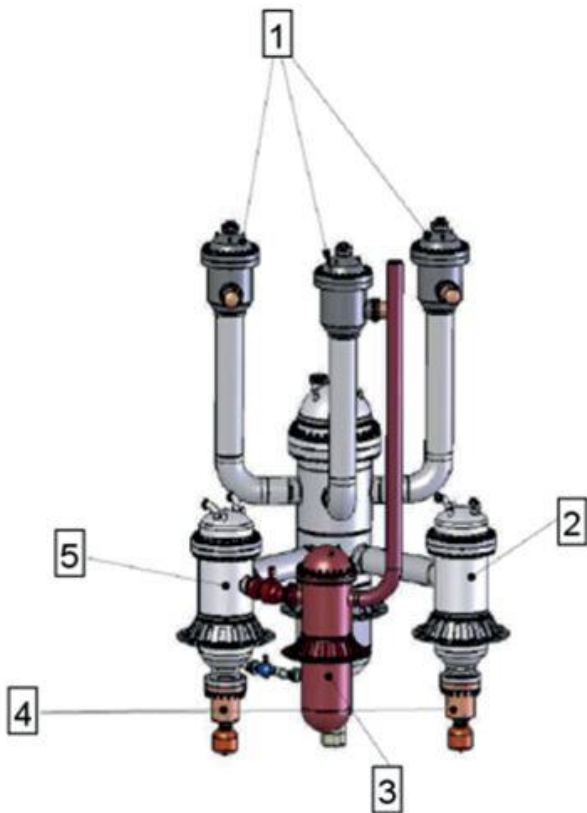
Ténylegesen a CEA 2008-ra elkészítette az ALLEGRO első terveit és azokat a GoFastR EURATOM projekt 2012-re finomította. Mindazonáltal a tervek számos biztonsági hiányosságot tartalmaznak, amelyek egy részét a fukusimai baleset követően lehetett azonosítani. Ezért a V4G4 2015-ben elhatározta az ALLEGRO Projekt Előkészítő Fázisának indítását. Ennek célja a reaktor koncepciótervének kidolgozása 2025-ig. A munka során minden biztonsági problémát el kell hártani és a nyitott technológiai kérdéseket meg kell oldani. Ez a nagyon ambiciózus terv intenzív műszaki tervezési és nukleáris biztonsági tevékenységet irányoz elő, amelyet kísérletek és a berendezések minősítése kísér. A Műszaki Tervezési és Biztonsági Útitervben [1] 2018-ig előirányzott magyar hozzájárulást a Nemzeti Nukleáris Kutató Program finanszírozza.

Amennyiben az ALLEGRO megfelelő koncepcióterve előáll, elkezdődik az ALLEGRO Projekt Megvalósítási Fázisa, amelynek során el kell készíteni a részletes műszaki terveket és a Biztonsági Jelentést, a kiszemelt telephely (várhatóan Bohunice) alkalmasságának vizsgálatát, meg kell szerezni a Létesítési Engedélyt, meg kell építeni és üzembe kell helyezni a reaktort. Az üzembe helyezésre nyilván nem fog sor kerülni 2035 előtt.

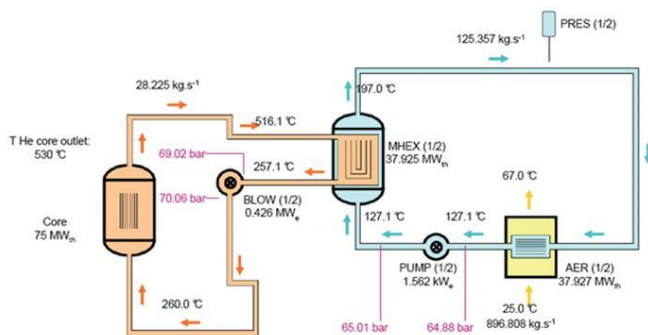
Az ALLEGRO reaktor képét mutatja az 1. és a 2. ábra, míg a 3. ábra a primer hűtőkör tervezett paramétereit szemlélteti.



1. ábra: Az ALLEGRO reaktor a védőtartályban



2. ábra: Az ALLEGRO reaktor primerköre
1 – maradványhő eltávolító rendszer
2-5 – primerköri berendezések



3. ábra: Az ALLEGRO egyik főhűtőkörének paraméterei

A fűtőelem-viselkedési számítások

Magyarországon 1996 után kezdődtek fűtőelem-viselkedési számítások. Az MTA EK jogelődjében, a KFKI AEKI-ben évtizedes tapasztalat halmozódott fel a reaktorfizikai és termohidraulikai számítások terén. Ez a tapasztalat kiterjedt a számításokat végző kódok fejlesztésére és alkalmazására, valamint a saját magas színvonalú méréseinkkel történt validációra. Ennek ellenére a fűtőelemek reaktorbeli viselkedésével nem foglalkoztunk, mert az teljes mértékben a szovjet szállító illetékességéhez tartozott. 1988-ban azonban elkezdtük saját fűtőelem-viselkedési méréseinket, elsősorban Matus Lajos és Maróti László munkássága révén. Ezek nagyon értékesnek bizonyultak, amikor a rendszerváltás és a Szovjetunió összeomlása következtében a szovjet partnerre nem lehetett támaszkodni, viszont frissen szerzett saját tudásunk lehetővé tette a kiváló szakmai együttműködést a német intézetekkel (elsősorban Karlsruhe-val). Így amikor az 1990-es évek közepén finn-magyar kooperáció kezdődött az angol BNFL cég által szállítandó alternatív fűtőelemek

tanulmányozására, akkor szakembereink már kellőképpen felkészültek voltak. (Érdeemes megjegyezni, hogy bár a magyar kormány erősen ambicionálta a fűtőelem-diverzifikációt, a vezető paksi szakemberek számára kezdettől fogva világos volt az, hogy az angolok nem lesznek képesek az orosz fűtőelem minőségét elérő fűtőelemek szállítására. Ugyanakkor a BNFL projektben szerzett tapasztalatokat kiválóan lehetett arra használni, hogy a későbbiekben az orosz TVEL a nemzetközileg elfogadott igényeknek megfelelő részletességű megalapozó dokumentációt adjon át a fűtőelemek fejlesztéséről. Arra is érdemes kitérni, hogy a finnek az egyik loviisa-i blokkon valóban alkalmazták a BNFL fűtőelemeket, de jó tíz évvel később mégis visszatértek az orosz fűtőelemek használatára.)

A BNFL-projekt irányította rá figyelmünket arra, hogy kellően részletes számítások is szükségesek ahhoz, hogy a fűtőelemek reaktorbeli viselkedését meg tudjuk ítélni. Így megkezdődött a FUROM kód kifejlesztése [2] (ennek során fel lehetett használni az orosz-cseh fejlesztésű PIN-micro kódot [3] és hasznos volt a BNFL ENIGMA kódjának [4] ismerete is.) A FUROM kód feladata a fűtőelem-viselkedés leírása a normál üzem, azaz kvázi-stacionárius körülmények között.

Mit is kell modellezni ahhoz, hogy le tudjuk írni egy fűtőelem-pálca viselkedését? Először is szükség van egy sor reaktorfizikai és termohidraulikai adatra, vagyis a pálca történetére. Ezen belül szükség van a reaktorba behelyezett pálca részletes geometriai és anyagi adataira, a hőteljesítmény axiális eloszlásának időbeli menetére, valamint a vízhűtés hely- és időfüggő adataira. A modellek leírják a tablettaszlop kiégés miatti összetétel-változását, termomechanikai változásait, a hasadási gázok kibocsátását, továbbá a burkolat bonyolult termomechanikai változásait.

A termomechanikai probléma bonyolultságát jól érzékelteti, ha arra gondolunk, hogy a burkolatra ható külső nyomás kezdetben jóval meghaladja a pálca belső gáznyomását, ezért a burkolat „befelé” deformálódik. Ugyanakkor a hasadási gázok kibocsátása következtében a pálca belső nyomása nő. A tablettaszlop méretei nőnek, a tabletták megduzzadnak és végül a tabletták és a burkolat belseje mechanikai kölcsönhatásba kerül. Innen kezdve a burkolat „kifelé” deformálódik. A burkolat deformációjának egy része – a sugárkárosodás miatti deformációk és a kúszás – maradandó alakváltozás.

Ugyancsak bonyolult probléma a gázkibocsátás, mivel annak mechanizmusa nem teljesen ismert. A hasadásban keletkező gázok valamilyen mértékben oldva maradnak az üzemanyag szemcséiben, de részben buborékokat képeznek a szemcséközi térben. Elég nagy kiégés és/vagy hőmérséklet esetén a buborékok szétpattannak, és a gázok kijutnak a tablettákból.

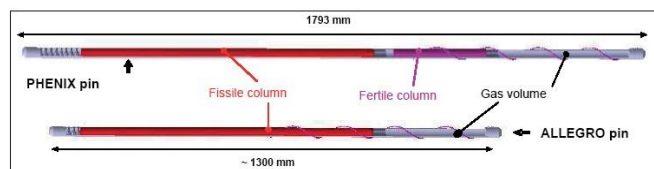
Ez a bonyolult modellezés azonban mindössze a kvázi-stacioner viselkedést írja le, azaz a normál üzemi folyamatok, tranziensek nyomon követésére alkalmas. Az üzemzavari folyamatok leírására az MTA EK-ban egy amerikai eredetű programot használunk, ennek neve FRAPTRAN [5]. A programot módosítani kellett a speciális orosz burkolatanyag tulajdonságainak figyelembe vétele céljából [6]. A gyors üzemzavari folyamatok (LOCA és RIA) során újabb fizikai jelenségek is fellépnek.

Megjegyzendő, hogy az MTA EK a FUROM és a FRAPTRAN kódokat kifejezetten az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. által megrendelt elemzésekre használja. Az elmúlt évtizedben a kódokat felhasználtuk az orosz szállító fűtőelem-viselkedési számításainak független szakmai ellenőrzésére. Ellenőrizni lehet, hogy a fűtőelemek a normál üzem és az üzemzavarok során teljesítik-e a biztonsági és a releváns tervezési kritériumokat. Ezen túlmenően a FUROM kóddal végzett sorozatszámítások jelentős mértékben hozzájárulnak az új fűtőelem-típusok megválasztásához, tervezéséhez és bevezetéséhez. Ugyanakkor az MTA EK adaptálta a német TRANSURANUS kódot [7] is (ez mind a normál üzemi, mind az üzemzavari fűtőelem-viselkedést leírja), abból a célból, hogy a hatóság maga is végez(tet)hessen független fűtőelem-viselkedési elemzéseket.

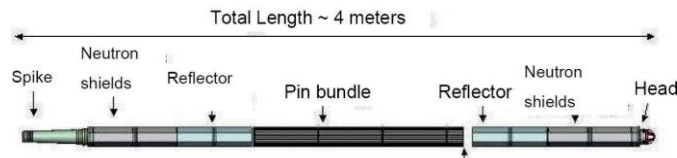
Az MTA EK-ban kiterjedt munka folyik a fűtőelem-viselkedési kódok validációjára. Ennek a tevékenységnek a során jól fel lehet használni a nemzetközi adatbázisokat, de különösen fontosak a haldeni reaktornál végzett mérések. A norvégiai Haldenben egy nyomott-nehézzvízes kutatóreaktor működik, amely évtizedek óta az OECD Nuclear Energy Agency projektjének a bázisa. A nemzetközi programban – amelynek az MTA EK is tagja – különböző fűtőelemek különböző paramétereit méri, „a” világszínvonalon. A nemzetközi projekten kívül a fűtőelem-gyártók kétoldalú szerződés keretében szereznek be mérési információkat, de ehhez nekünk nincs hozzáférésünk. Validáció nélkül programjaink értéktelenek lennének, mert a modellek – még ha azok is kísérleti adatokon nyugszanak – nem eléggé megbízhatóak ahhoz, hogy a kódok végeredményeit kísérleti ellenőrzés nélkül el lehessen fogadni.

ALLEGRO fűtőelem-viselkedési számítások

Egyelőre teljesen tisztázatlan, hogy melyik cég lesz az ALLEGRO reaktor fűtőelemeinek szállítója. Annyi bizonyos, hogy a reaktor működésének első szakaszában a zóna acélburkolatú fűtőelemekből fog felépülni, mert gyorsreaktoros tapasztalat csak ilyen burkolatra létezik. A 4. ábra az ALLEGRO tervezett fűtőelem-pálcáját, az 5. ábra pedig a köteget ábrázolja. A cirkónium-alapú burkolat alkalmatlan, mert a magasabb hőmérséklet miatt kúszása megengedhetetlenül nagy. Sajnos, a GFR számára az acélburkolat sem megfelelő, mert az acél olvadáspontja viszonylag alacsony (maga az acél már jóval kisebb hőmérsékleteken is elveszti szilárdságát), így egy súlyosabb üzemzavar során fellépő hőmérséklet-növekedés a fűtőelemek sérüléséhez vezethet. A gázhűtésű reaktorban a hőmérséklet gyorsan nő, mert a gáz (ez minden bizonnyal hélium lesz) hőtehetetlensége kicsi. Éppen ezért az ALLEGRO koncepciótervének egyik sarkalatos kérdése, hogy a reaktor olyan alacsony teljesítmény-sűrűséggel működjék, hogy a maradványhő termelődése ne vezethessen túlzottan magas burkolat-hőmérséklet fellépéséhez. (Ugyanakkor a teljesítmény-sűrűség maximumának elég nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy értelmes idő alatt végzett besugárzások révén vizsgálni lehessen a majdani kerámia fűtőelemek tulajdonságait.)



4. ábra: A tervezett ALLEGRO fűtőelem-pálcá (összehasonlítva a PHENIX pálcájával)



5. ábra: A tervezett ALLEGRO fűtőelemköteg

A GFR-ben a tervek szerint kerámia burkolatú fűtőelem-pálcákat fognak használni. A várható anyag a SiC-szálerősítésű SiC, amelynek megmunkálható előállítását jelenleg nem problémamentes. A burkolatanyag nem csak nem áll jelenleg rendelkezésre, hanem nagyon komoly minősítési programon kell átesnie, mielőtt engedélyeztethető lenne reaktorban való használata. AZ ALLEGRO reaktor egyik fő célja éppen az, hogy függőleges besugárzó csatornáiban el lehessen végezni a kerámia-anyag, majd egész pálcák besugárzását és az azt követő laboratóriumi vizsgálatok vezessenek el a minősítési program befejezéséhez. Ezek alapján azután az ALLEGRO működésének második fázisában a reaktorzóna már kerámia burkolatú fűtőelemekből fog felépülni.

Itt kell megemlíteni egy igen fontos körülményről. A GFR üzemanyaga minden bizonnyal nagy mennyiségű (20-25%) plutóniumot fog tartalmazni, valószínűleg inkább karbid (UPuC) formában, mint oxidként. A valóságos GFR kísérleti fűtőelem-pálcák vizsgálata azonban proliferációs kockázatot jelent. A Visegrádi Négyek országaiban – csakúgy, mint Franciaország és egyelőre Nagy-Britannia kivételével minden Európai Unió tagállamban – plutóniumos laboratóriumi vizsgálatok nehezen elképzelhetőek, minden bizonnyal csak nagyon bonyolult nemzetközi diplomáciai erőfeszítések után, speciális biztonsági (security) körülmények között lehetnek megvalósíthatóak. (Ennél valószínűleg csak a kiegészítő fűtőelemek szállítása Szlovákiából pl. Franciaországba lenne nehezebb.)

Azon kívül, hogy ez a körülmény jelentősen hátráltathatja az egész ALLEGRO Projekt megvalósítását, jelentősen befolyásolja a fűtőelem-viselkedési számításokat is. Évek alatt kiderült, hogy a CEA semmiképpen sem fogja átadni a fűtőelem-viselkedési kódját vagy kódjait, miközben a GFR számításokra használt reaktorfizikai és termohidraulikai kódjait átadta. Éppen ezért az ALLEGRO koncepciótervének kidolgozása során nincs más választásunk, mint a FUROM és FRAPTRAN kódok megfelelő átalakítása.

2015-2016-ban az AEMI Atomenergia Mérnökiroda Kft. az MTA EK alvállalkozójaként, a Nemzeti Nukleáris Kutatási Program keretében elvégezte a FUROM és FRAPTRAN kódok acélburkolatú fűtőelemekre való alkalmazásának megalapozását [8].

Ennek a munkának a során a következő problémákat kellett megoldani:

- A hélium termomechanikai adatbázisának összegyűjtése (sűrűség, dinamikus viszkozitás, hőátadási tényező, hővezető képesség, Nusselt-szám, fajhő),
- A gyorsreaktor fűtőelemek tablettáira vonatkozó termomechanikai adatok összegyűjtése (olvadáspont, hőtágulás, fajhő, Poisson-szám, Young-modulusz, folyáshatár, szakítószilárdság, hővezető képesség, duzzadási paraméterek - mindez U-Pu vegyes oxid, nitrid és karbid anyagra),
- Az acélburkolat termomechanikai adatbázisának összegyűjtése (sűrűség, összetétel, olvadáspont, hőtágulás, fajhő, Poisson-szám, Young-modulusz, folyáshatár, szakítószilárdság, a képlékeny alakváltozás paraméterei, hővezető képesség, kúszási paraméterek, duzzadási paraméterek).

Mindhárom feladatot elvégeztük. Meghatároztuk, hogy a kódokban végül is mely adatokat ajánljuk felhasználásra. Az adatbázisok alapja a nemzetközi szakirodalom, jogilag védett információt nem használhatunk.

Az érdekesség kedvéért érdemes a következőket megjegyezni.

- Amikor az acélburkolat és a hélium hűtőközeg közti hőátadást írjuk le, akkor figyelembe kell venni, hogy az ALLEGRO pálcák burkolatán olyan, acélból készült terelőspirál helyezkedik el, amelynek következtében a hőátadás jelentős mértékben javul. A vonatkozó formulákat a CEA szerzői jogokra való hivatkozással nem volt hajlandó átadni, de azokat végül egy nyilvánosan publikált forrásban megtaláltuk.
- Egyelőre nehezen értékelhető, hogy a FUROM kód képes lesz-e az ALLEGRO fűtőelem-tabletták gázkibocsátásának számítására. Gyorsreaktorban a magasabb hőmérséklet

miatt a gázkibocsátás elérheti a hasadásban létrejövő gázok 90%-át is, míg a szokásos termikus reaktorokban, nagy kiegészések mellett is ez legfeljebb 15-20% lehet. A FUROM kódban a gyakori nagy teljesítmény-változtatások mérések leírására bevált, nemrégiben bevezetett új modellt kívánjuk használni, de ennek ellenőrzése biztosan nagyon nehéz lesz.

- A rengeteg, különböző acélokra vonatkozó termomechanikai adatok közül azokat akarjuk használni, amelyek a francia tervekben szereplő acélra vonatkoznak. Ezek persze szintén védettek, de egy részüket publikálták, más részük pedig egy közelálló acél-fajta adataival kiváltható.

Mindezek alapján 2017-ben létre akarjuk hozni a FUROM-FBR kódot, kifejezetten az ALLEGRO acélburkolatú fűtőelemeinek számítására.

A legnagyobb problémát sajnos a validációs adatbázis hiánya jelenti, gyakorlatilag a megfelelő mérések teljességgel hiányoznak a nyilvános irodalomból. Reméljük, hogy a CEA-val való együttműködés keretében sikerül majd ebben a tekintetben valami eredményt elérnünk, hiszen a franciák rengeteg tapasztalattal rendelkeznek a nátriumhűtésű gyorsreaktorok és azok fűtőelemei tekintetében.

Összefoglaló

Igyekeztünk bemutatni, hogy mi az ALLEGRO Projekt célja: egy olyan demonstrációs reaktor létrehozása, amely egyrészt alkalmas a magas hőmérsékletű gázhűtésű gyorsreaktor technológia működőképességének demonstrálására, másrészt felhasználható a majdani teljesítményreaktor kerámia fűtőelemeinek minősítésére. A reaktor tervezésében fontos szerepet kapnak a fűtőelem-viselkedési számítások. Az acélburkolatú gyorsreaktor fűtőelem-pálca modellezési adatbázisának létrehozásával megkezdődött a fűtőelem-viselkedési kódok adott célra történő átalakítása.

Irodalomjegyzék

- [1] *Design and Safety Roadmap of the ALLEGRO Project - Preparatory Phase*, 2015.
- [2] *Gadó J., Griger Á., Kulacsy K.: A FUROM-2.1.1 kód dokumentációja*, 2016.
- [3] *F. Pazdera, M. Valach, P. Strijov at al. User's Guide for the Computer Code PIN-micro*, 1991.
- [4] *The ENIGMA-B fuel performance code User Guide Version 7.3*, 1997.
- [5] *K.J. Geelhood, W.G. Luchner, J.M. Cuta, I.A. Porter, FRAPTRAN-2.0: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods, PNNL-19400, Vol. 1. Rev2*, 2016.
- [6] *Győri Cs., Molnár A., Keresztúri A.: A FRAPTRAN program adaptálása a VVER gadolíniumos fűtőelemek tranziens számításaihoz, AEKI-RAL-2007-732/09-M0*, 2007.
- [7] *TRANSURANUS Handbook, Document Number Version 1 Modification 2 Year 2015 ('V1M2J15')*, 2015.
- [8] *J. Gadó, Data of ALLEGRO fuel thermo-mechanical properties, AEMI-2016-206-3.4-01-M0*, 2016.