



MÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI MEGOLDÁSOK

ENGINEERING AND IT SOLUTIONS

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
INFORMATIKAI KAR
SAVARIA MŰSZAKI INTÉZET



2021. 1.

MÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI MEGOLDÁSOK
ENGINEERING AND IT SOLUTIONS

2021. 1.

IMPRESSZUM

Főszerkesztő

Dr. Safranyik Ferenc

Szerkesztők

Dr. Andó Mátyás

Prof. Dr. Sidor Jurij

Szerkesztőbizottság

Dr. Bak Árpád	Prof. Dr. Horváth Béla
Dr. Barányi István	Prof. Dr. Kalácska Gábor
Dr. Bencsik Gergely	Prof. Dr. Keppler István
Dr. Czupy Imre	Dr. Keresztes Róbert Zsolt
Prof. Dr. Csóka Levenete	Prof. Dr. Kollár László
Prof. Dr. Eleőd András	Dr. Pödör Zoltán
Dr. Farkas Gábor	Dr. Szakál Zoltán
Dr. Fekete Gusztáv	Dr. Szekeres Béla János
Dr. Fenyvesi Dániel	Dr. Varga Attila
Dr. Gál László	Dr. Zsidai László

Felelős kiadó

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Informatikai Kar
Savaria Műszaki Intézet
Prof. Dr. Kollár László, intézetigazgató

Borítóterv

Dr. Safranyik Ferenc

HU ISSN 2677-1691

DOI <https://doi.org/10.37775/EIS.2021.1>

© ELTE, Informatikai Kar, Savaria Műszaki Intézet, 2020.

9700, Szombathely, Károlyi Gáspár tér 4.

Kapcsolat: sf@inf.elte.hu, [URL](#)

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	4
Lengyel Tamás, Varga Attila	
Proppant szemcsék mikromechanikai paramétereinek meghatározása	5
Hervai Dávid Dominik, Safranyik Ferenc	
Abrazív vízvágás numerikus modellezése	12
Jánoki András, Safranyik Ferenc, Kollár László	
Sodronykötél anyagmodelljének kidolgozása	22
Magyarics Norbert, Safranyik Ferenc, Andó Mátyás	
3D nyomtatott rétegek közötti adhézió kísérleti vizsgálata	29
Kondics Milán, Szekeres Béla János	
Optimális neurális hálózat kiválasztása Bayes-bebecslés segítségével	37
Magyar Gergely, Sebestyén László Ádám, Magyar Gábor, Andó Mátyás	
Rendezetlen alkatrészek rakodási folyamatának fejlesztése	47
Lajber Kristóf, Borbély Tibor, Kollár László, Szilvágyi Milán	
Tesztberendezés távvezetésekről leszakadó jég keltette lengések modellezésére	55

ELŐSZÓ

Nagy örömmre szolgál, hogy a 2020-ban indult Mérnöki és Informatikai Megoldások című folyóirat a második évfolyamához érkezett. Jelen szám már a harmadik, egy magyar és egy angol nyelvű kiadvány után másodszer jelentkezik magyarul. A folyóirat jelentősége nemcsak abban rejlik, hogy a cikkek témája a műszaki és informatikai tudományok széles területét fedi le, és ezáltal széles olvasótábornak nyújt információt a legújabb eredményekről, hanem lehetőséget ad a legjobb hallgatói projektek bemutatására is. A jelenlegi számban közölt hét cikk többsége is olyan munkák eredményeit mutatja be, amelyekben a Savaria Műszaki Intézet által gondozott gépészmérnök képzés hallgatói aktívan részt vettek. Kiemelendő viszont, hogy a folyóirat helyet ad ipari szereplők által végzett kutatások, fejlesztések bemutatására is. A mostani kiadványban neves magyar cégek, a BPW Hungária Kft, a MOL Zrt. és a Knorr-Bremse Kft., mérnökei osztják meg tudományos munkájuk eredményeit az olvasóval. Akár hallgatói közreműködéssel végzett projekteket, akár más egyetemi, akadémiai kutatásokat, vagy ipari problémákat részleteznek a cikkek, azok magas színvonalát a tudományterület elismert kutatóinak a lektori és szerkesztőbizottsági munkája biztosítja. A folyóirat küldetésének megfelelően a közölt publikációk ezúttal is változatos tématerületeket fednek le, beleértve a szemcsés anyagokat, távvezetékekhez kapcsolódóan lengések és anyagi viselkedés modellezését, valamint neurális hálózatok, 3D nyomtatás, robotprogramozás és vízvágás területén további témákat.

Ma már a műszaki és az informatikai tudományok szorosan összefonódnak, a határterület, ahol mindkét tudományág ismerete szükséges, egyre szélesebb, az itt végzett kutatások, fejlesztések egyre jelentősebbek és szerteágazóbbak. A folyóirat teret ad a két tudományágban és határterületükön végzett tanulmányok közzétételének, és ezáltal ezeken a területeken az oktatók, kutatók közötti eszmecserének. Bízom benne, hogy minden érdeklődő talál tanulságos olvasnivalót a következő oldalakon.



2021. április, Szombathely

Prof. Dr. Kollár László
intézetigazgató
ELTE-IK, Savaria Műszaki Intézet

PROPPANT SZEMCSÉK MIKROMECHANIKAI PARAMÉTEREINEK MEGHATÁROZÁSA

Lengyel Tamás^a, Varga Attila^{b*}

^a MOL Petrolkémiai Zrt., általános üzemirányító

^b Knorr-Bremse VJRH Kft., számítási mérnök

ABSZTRAKT

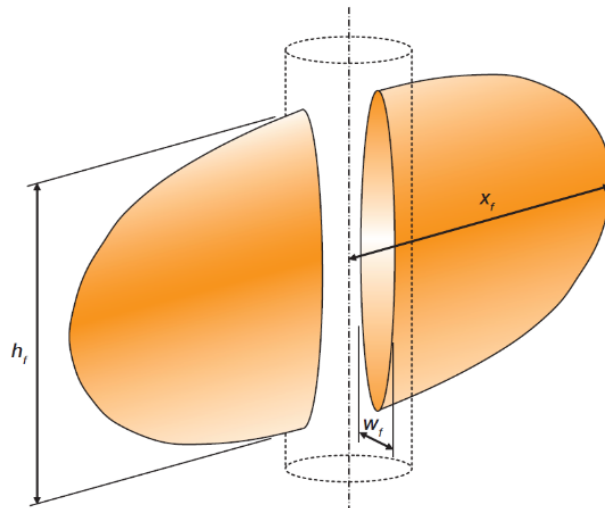
Munkánk során a hidraulikus rétegrepsztesnél használt kitámasztó anyag (proppant) mikromechanikai paramétereit határoztuk meg a YADE nyílt forrás kódú és az EDEM Academic diszkrét elemes szoftverek segítségével. A paraméter identifikációs technikák közül a siló kifolyást választottuk. A kísérleti vizsgálatok során a silóból kifolyt szemcsehalmaz tömegét mértük az idő függvényben és minden esetben meghatároztuk az átlagos kifolyási tömegáramot. A numerikus és a kísérleti úton kapott tömegáramok összehasonlításánál azt tapasztaltuk, hogy az általunk meghatározott mikromechanikai paraméterek alkalmasak a proppant szemcsék mechanikai viselkedésének leírására.

Kulcsszavak: *hidraulikus rétegrepsztes, diszkrét elemes módszer, proppant*

1. Bevezetés

A hidraulikus rétegrepsztes egy rétegkezelési eljárás, mellyel az elsősorban gyenge hozammal rendelkező kutak produktivitását lehet jelentősen javítani. Jelenleg ez technológia a leghatásosabb stimulációs eljárás az olajiparban [1]. A repesztést a felszínen, nagy nyomású szivattyúk segítségével inicializálják, azonban valójában a mélyben, általában közel a kúttalphoz, a szénhidrogént tartalmazó rétegben hozzák létre. A szivattyúzott repesztő fluidum 99%-ban vizet, a maradék 1%-ban pedig adalékanyagokat tartalmaz. Az adalékanyagok elsősorban a fluidum reológiai tulajdonságának beállításáért felelnek. Megfelelően viszkozus közeg létrehozása a cél annak érdekében, hogy a művelet során a folyadék a magasabb viszkozitás miatt nyomásemelkedést hozzon létre és képes legyen mechanikai feszültség generálásra [2]. A feszültség következtében a tároló kőzetmechanikai tulajdonságai miatt megreped. Ez a repedés, a repesztő fluidum által létrehozott nyomás hatására tovább terjed a tárolóban a kőzetfeszültségi irányoknak megfelelően (1. ábra). A hidraulikus nyomás megszűnése előtt az így kialakított repedéseket úgynevezett proppant szemcsékkel szükséges kitámasztani. A proppant szemcsékkel nagyságrendekkel növelhető a formáció áteresztőképessége. Az eljárás befejeztével tisztító termeltetés következik, mely során a repesztő fluidum visszaszivattyúzása történik.

A vizsgált jelenség a rétegrepsztes során, illetve gyakorlatilag közvetlen utána zajlik le, mikor a felszíni szivattyúzási nyomás megszűnik. Ekkor a repesztő folyadék az áramlástanai viszonyoknak megfelelően kiszűrődik a rétegbe, amíg be nem áll az egyensúly a kőzetnyomás illetve a repedésben kialakult hidraulikus nyomás között. Az egyensúlyi állapot után a rétegnomás az „eredeti viszonyoknak megfelelően” meghaladja a repedésben uralkodó hidraulikus nyomást, így a kőzet a dinamikai viszonyoknak megfelelően visszazáródik. A repesztés során a repedésbe szivattyúzott proppant szemcsék feladata a záródási folyamat megakadályozása. Az általunk vizsgált jelenség pedig ebben az időlépcsőben kialakult állapot, azaz kőzetzáródás hatására a proppant szemcsék deformációja, illetve a kőzetbe való beágyazódása.



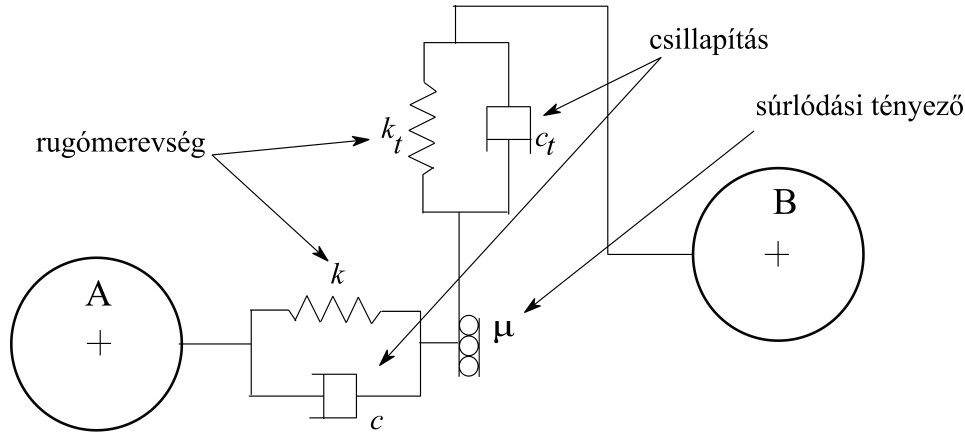
1. ábra: A repedés sematikus ábrája a kútban (h_f , w_f a repedésszélesség és x_f a repedéshossz) [3]

A kutatási problémát alapvetően kétféle módszerrel lehet megvizsgálni. Az egyik a korábban használt analitikus módszer, a másik pedig a numerikus modellezés. Az analitikus módszer, melyet korábbi munkánkban [4] használtunk a Hertz-féle kontakt elméletből [5] vezethető le, melyet a repedés szélesség-változás vizsgálatára Li és társai [6] használtak először. Az analitikus megoldás viszonylag egyszerű, ugyanakkor határokat szab a probléma pontos leírásának. A numerikus modellezés ezzel szemben a problémának megfelelően összetett, azonban képes figyelembe venni bizonyos tényezőket, melyet az analitikus módszer nem. Ilyenek: a proppant szemcse nem ideális alakja, valamint mérettartományon belüli szemcseméret szórása, a szemcsék elhelyezkedésének véletlenszerű jellege stb.

Feltevésünk szerint a diszkrét elemes módszer (DEM) alkalmas lehet a hidraulikus repesztés modellezésére. Ennek első lépése a proppant szemcsehalmaz mikromechanikai paramétereinek meghatározása. Jelen tanulmány ezen mikromechanikai paraméterek meghatározási módját mutatja be.

2. Diszkrét elemes modellezés

A diszkrét elemes módszert a szemcsehalmazok mechanikai viselkedésének leírására hozták létre. Egy numerikus eljárást diszkrét elemes modellnek tekinthetünk, ha egymástól egyértelműen elkülöníthető elemekből épül fel, és ezek az elemek önálló elmozdulási szabadságfokokkal rendelkeznek oly módon, hogy a modell képes követni az elemek véges nagyságú eltolódásait és elfordulásait (esetleg deformációit is). A modellt alkotó elemek között új kapcsolatok jöhetnek létre és meglévő kapcsolatok szűnhetnek meg és a topológia ezen változásai automatikusan nyomon követhetők a számítások során [7]. A számítások eredménye részben a rendszer geometriai jellemzőitől (szemcsealak, szerkezeti elemek alakja), részben a diszkrét elemek közötti (mechanikai) kapcsolatokról függ. A diszkrét elemes szoftverek kapcsolati modelleket használnak az elemek közötti kölcsönhatások (erők, nyomatékok) leírására. A kapcsolati modellek állandóit mikromechanikai paramétereknek nevezzük. A diszkrét elemes modellezésnél az egyik a legnehezebb feladatot ezen paraméterek meghatározása jelenti (néhányik közvetlenül nem is mérhető). A legtöbb esetben a kalibrációs folyamat több időt vesz igénybe, mint a modell felépítése, futtatása és kiértékelése együttvéve. Meghatározásukhoz ún. paraméter identifikációs technikákat szoktak alkalmazni [8]. Vizsgálatainkat az EDEM Academic és a Yade nyílt forráskódú szoftverkörnyezetben végeztük. Az EDEM szoftverben a kohéziómentes anyaghalmozatok modellezésénél már bevált Hertz-Mindlin kapcsolati modellt alkalmaztunk (2. ábra), melynek részletes leírása megtalálható [9]-ben.



2. ábra: A Hertz-Mindlin kapcsolati modell [9]

A keresett mikromechanikai paraméterek a következők:

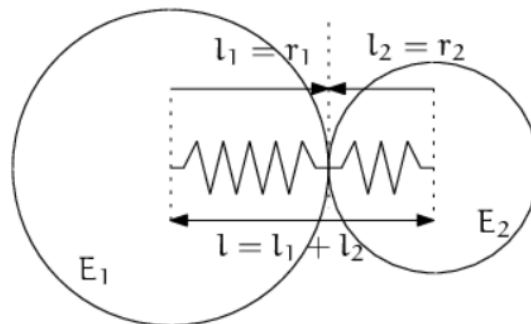
- Poisson-tényező (μ),
- csúsztató rugalmassági modulus (G),
- sűrűség (ρ),
- ütközési tényező (C_r),
- statikus súrlódási tényező (μ_0),
- gördülési ellenállás tényező (μ_r).

YADE szoftverkörnyezetben úgynevezett BALL típusú modellt alkalmaztunk. Ebben az esetben a megoldó két sorosan kapcsolt rugó merevségéből számolja a kapcsolat normál merevségét (3. ábra). A BALL típusú modell részletes leírása megtalálható [10]-ben.

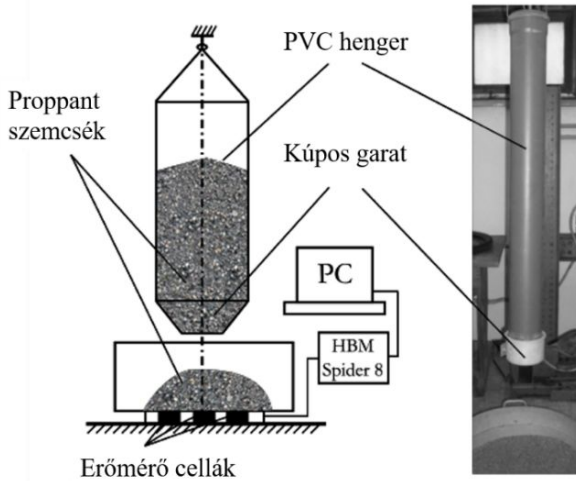
A YADE-ban keresett mikromechanikai paraméterek:

- Young-modulus (E),
- Poisson-tényező (μ),
- sűrűség (ρ),
- ütközési tényező (C_r),
- súrlódási szög (φ),
- gördülési ellenállás tényező (μ_r).

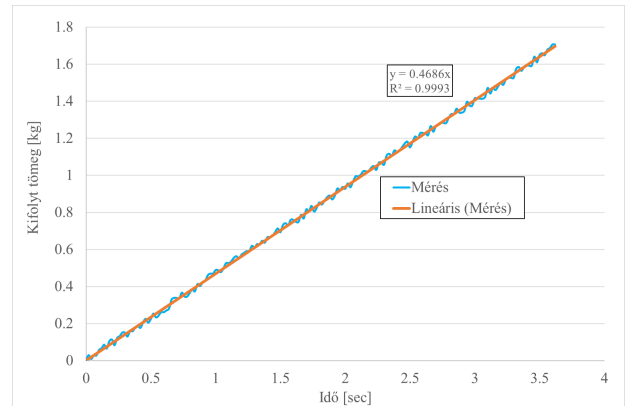
A szimulációk során a megoldó a lendület- és perdülettételt alkalmazva felírja az egyes szemcsék mozgásegyenletét, majd az így keletkező differenciálegyenlet rendszert oldja meg kis időléptékek sorozatán keresztül. Az időléptéknek nagy hatása van a numerikus modell stabilitására.



3. ábra: A BALL típusú modell YADE szoftverkörnyezetben [10]



4. ábra: A mérőrendszer összeállítása [11]



5. ábra: A mért tömeg-idő függvény

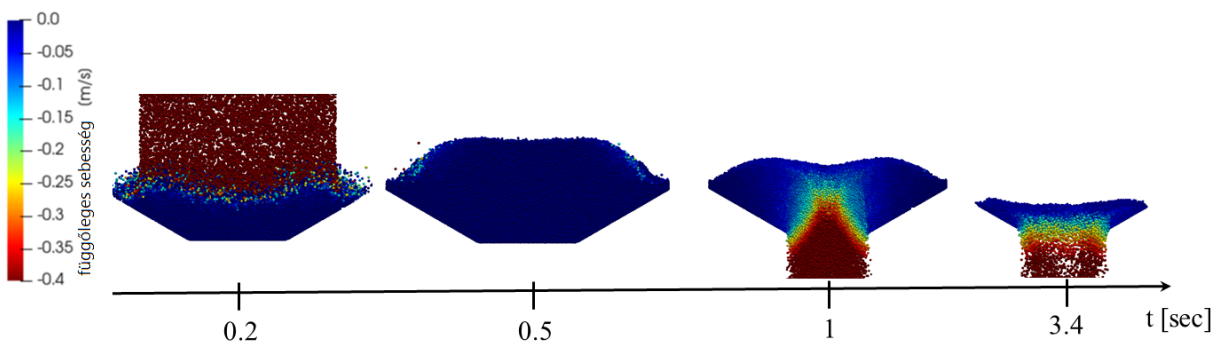
3. Kísérleti vizsgálatok

A legelterjedtebb paraméter identifikációs vizsgálatok a nyíróvizsgálat és a siló kifolyás. Munkánk során a siló kifolyást választottuk. A hengeres silók kifolyásának kísérleti vizsgálatát a (4. ábrán) látható mérő- és adatfeldolgozó rendszerrel ellátott modellsilóval végeztük. A modellsiló egy 110 mm átmérőjű, 700 mm hosszúságú PVC henger, amelyhez 35 mm átmérőjű kifolyónyílással ellátott kúpos kialakítású garat csatlakozik. A garat félkúp szöge 60° volt. A vizsgált anyaghalmaz tömege 1,7 kg. A kifolyt tömeget 3 HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) C9B erőmérő cellával mértük. Az adatfeldolgozást a HBM Spider típusú 8 csatornás mérőerősítő- és adatgyűjtő egység végezte (4. ábra).

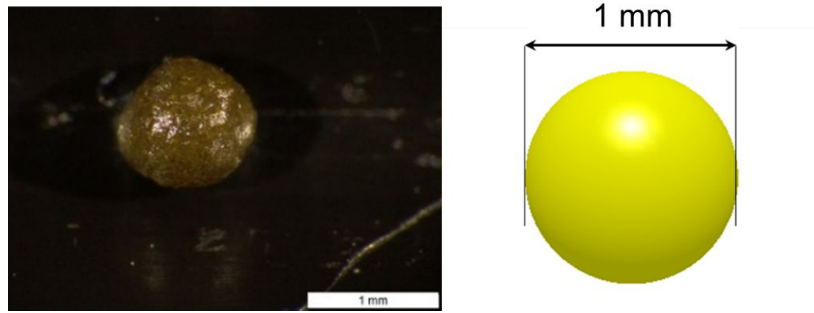
Az alkalmazott mintavételi frekvencia 50 Hz volt. Az adatfeldolgozás során az összetartozó tömeg-idő adatokat közös koordináta-rendszerben ábráztuk és minden esetben meghatároztuk az átlagos kifolyási tömegáramot. A jelenség lineáris jellege miatt kézenfekvő megoldás volt a lineáris regresszió alkalmazása (5. ábra). A méréseket ötszörös ismétléssel végeztük.

4. Diszkrét elemes szimulációk

A diszkrét elemes szimuláció lépései mindkét szoftver esetében azonosak voltak. Az első lépés a szemcsék véletlen generálása a modellterben, melyek a gravitáció hatására lefullnak a modellter aljára. A kifolyási folyamatot akkor indítottuk el, amikor a rendszer elérte az egyensúlyi állapotot (a korábbiakban bemutatott rezgőrendszer lecsillapodott). Ezután a siló alja kinyílt és a siló kiürült. A szimulációs folyamatot a gravitációs „töltéstől” a kiürülésig a 6. ábra mutatja.



6. ábra: A szimulációs folyamat



7. ábra: A proppant szemcse mikroszkópos felvétele és diszkrét elemes modellje

A numerikus modell megoldása során a silóban lévő szemcsehalmaz tömegét rögzítettük. A modellezés első lépéseként definiálnunk kell a szemcse alakját és méretét, valamint a szemcseméret eloszlást. A proppant szemcsék gömbölyűsége közel 90%-os, ezért tökéletes gömbként modelleztük a teljes szemcsehalmazt (7. ábra).

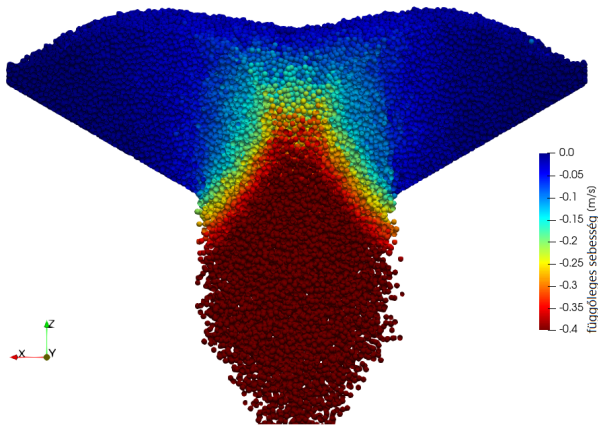
Mivel a gyakorlatban alkalmazott proppantok méretének szórása viszonylag kicsi, ezért a szimulációk során valamennyi szemcse átmérője 1mm volt. A szemcse-fal és a szemcse-szemcse közötti kölcsönhatások modellezéséhez meg kell adni a súrlódási tényezőt, a gördülési ellenállás tényezőjét, valamint az ütközési tényezőt. Az EDEM szoftver Rayleigh időléptéket használ, mely az ütközések okozta „lökéshullámok” egy szemcsén való áthaladásának idejével kapcsolatos mennyiség. A szimulációk során az alkalmazott időlépték $\Delta t = 1,214 \cdot 10^{-5}$ s volt. A kezdeti szimulációkat egy korábbi munkánkban [12] meghatározott paraméterekkel indítottuk. Az így kapott eredményeknél azt tapasztaltuk, hogy nem mutatnak jó egyezést a mérési eredményekkel, ezért szükséges volt paraméterek módosítása. Mivel a szemcsehalmazok mechanikai viselkedését nagyban befolyásolják a belső súrlódási viszonyok, ezért a súrlódási tényezőt és a sűrűséget módosítottuk. Az 1. táblázat mutatja a kezdeti és a módosított értékeket.

1. táblázat: A kezdeti és módosított mikromechanikai paraméterek az EDEM szoftverben

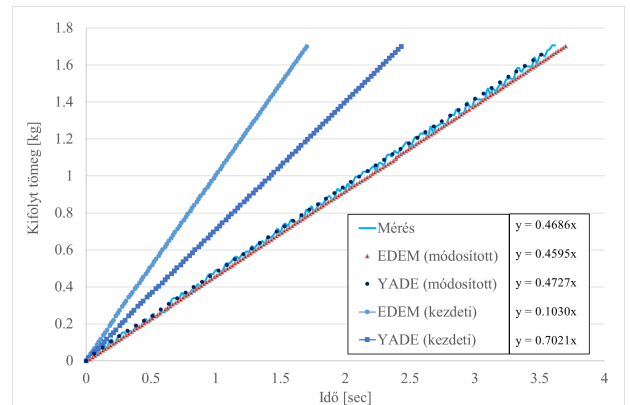
Mikromechanikai paraméter	Kezdeti érték		Módosított érték	
	proppant	siló	proppant	siló
Poisson-tényező (ν)	0,25	0,3	0,25	0,3
Csúsztató rug. modulus (G), [Pa]	$3,58 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$	$3,58 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$
Sűrűség (ρ), [kg/m ³]	3400	7500	2000	7500
Ütközési tényező proppantra (C_r), [-]	0,5	0,6	0,5	0,6
Súrlódási tényező proppantra (μ_0), [-]	0,3	0,25	0,3	0,3
Gördülési ellenállás tényező proppantra (C_r), [-]	0,01	0,01	0,01	0,01

2. táblázat: A kezdeti és módosított mikromechanikai paraméterek a YADE szoftverben

Mikromechanikai paraméter	Kezdeti érték		Módosított érték	
	proppant	siló	proppant	siló
Poisson-tényező (ν)	0,25	0,3	0,25	0,3
Young-modulus (G), [Pa]	$5 \cdot 10^{10}$	-	$5 \cdot 10^{10}$	-
Sűrűség (ρ), [kg/m ³]	3400	-	5000	-
Súrlódási szög proppantra (φ), [°]	2,8	2,8	10	1
Gördülési ellenállás tényező proppantra (C_r), [-]	10^{-4}	-	10^{-4}	-



8. ábra: Tölcséres kifolyási mód



9. ábra: A számított és kísérleti eredmények összehasonlítása

Későbbi vizsgálataink céljából a YADE nyílt forráskódú szoftverkörnyezetben is meghatároztuk a mikromechanikai paramétereket. A YADE megoldója kiszámítja a testekre ható erők eredőjének és a kölcsönhatásokból származó erők átlagának arányát és így lehetőséget ad a szemcsehalmaz dinamikai viselkedésének nyomon követésére. Statikus egyensúlyi állapotban a testekre ható erők eredője zérus, ezért az előbb említett aránynak is zérus értéket kell felvenni, amikor a szimuláció stabilizálódik. Azonban a véges pontosságú számítás miatt soha nem fogja elérni a zérus értéket. Az időlépték ebben az esetben $1,278 \cdot 10^{-5}$ s volt. A mikromechanikai paramétereket a 2. táblázat foglalja össze.

A YADE szoftver nagy előnye, hogy a szimulációk Python programozási nyelven megírt segédprogramokkal vezérelhetők. Az adatok kiértékelése (tömeg-idő diagram felvétele, lineáris regresszió stb.) a számítások elvégzése után automatikusan megtörtént. A szemcsék, sebességmezők, animációk stb. megjelenítésére a ParaView-t [13] használtuk. A sebességmezőt megvizsgálva megállapítottuk, hogy tölcséres kifolyási mód jött létre az ürítés során (8. ábra). Ezt követően összehasonlítottuk a számított és mért eredményeket és azt tapasztaltuk, hogy jó közelítéssel megegyeznek (9. ábra).

5. Következtetések

Jelen tanulmányban megállapítottuk, hogy a diszkrét elemes modellezés alkalmas a hidraulikus rétegrepesztésnél alkalmazott proppant szemcsék mikromechanikai paramétereinek meghatározására. A paraméter identifikációs technikák közül a silókifolyást választottuk. Az eredmények azt mutatták, hogy a BALL típusú és a Hertz-Mindlin kapcsolati modellek és az általunk meghatározott mikromechanikai paraméterek alkalmasak a proppant szemcsék mechanikai viselkedésének leírására. Munkánk során az EDEM és a YADE diszkrét elemes szoftvert használtuk, kihasználva mindkét szoftver előnyeit. További céljaink között szerepel a hidraulikus rétegrepesztés teljesítményének meghatározása diszkrét elemes módszer segítségével.

6. Köszönetnyilvánítás

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

7. Irodalomjegyzék

- [1] A.D. Taleghani, P. Puyang, B.R. Sarker, *Multi-Disciplinary Data Integration for Inverse Hydraulic Fracturing Analysis: A Case Study*, Unconventional Resources Technology Conference, San Antonio, Texas, 20-22 July 2015, [CrossRef](#)
- [2] M.J. Economides, K.G. Nolte, *Reservoir Stimulation, 3rd Edition*, Wiley, New York, 2000.
- [3] M.J. Economides, K.G. Nolte, *Modern Fracturing - Enhancing Natural Gas Production*, E.T.P. Inc., Houston, 2008.
- [4] Lengyel T., Jobbik A., Tóth A., *An Analytical Approach for Propped Fracture Conductivity*, Conference Proceedings of 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM, Volume 18, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining - Issue: 1.4, Oil and Gas Exploration, Albena, Bulgaria, 2018.
- [5] H. Hertz, *Über die Berührung fester elastischer Körper*, Gesammelte Werke (P. Lenard, ed.), Bd. 1, (J.A. Barth, Leipzig, 1895) pp. 155-173.
Eredeti megjelenés: Journal f.d. reine u. angewandte Mathematik 92, 1881, pp. 156-171, [CrossRef](#)
- [6] K. Li, Y. Gao, Y. Lyu, M. Wang, *New Mathematical Models for Calculating Proppant Embedment and Fracture Conductivity*, SPE Journal 20(03), 2015, pp. 496–507, [CrossRef](#)
- [7] Bagi K., *Fundamentals of the discrete element method*, egyetemi jegyzet, Budapest University of Technology and Economics, 2012.
- [8] C. González-Montellano, Á. Ramírez, E. Gallego, F. Ayuga, *Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos*, Chemical Engineering Science 66(21), 2011, pp. 5116-5126, [CrossRef](#)
- [9] P.A. Cundall, O.D.L. Stack, *A discrete numerical model for granular assemblies*, Geotechnique 29(1), 1979, pp. 47-65, [CrossRef](#)
- [10] V. Šmilauer, B. Chareyre, *Yade dem formulation*, V. Šmilauer (szerk.), *Yade Documentation, The Yade Project, 1st ed.* részlete, 2010, [url](#)
- [11] Oldal I., Safranyik F., *Extension of silo discharge model based on discrete element method*, Journal of Mechanical Science and Technology 29(9), 2015, pp. 3789-3796, [CrossRef](#)
- [12] Keppler I., Varga A., Szabo I., Katai L., Fenyvesi L., *Particle motion around open mixing screws: optimal screw angular velocity*, Engineering Computations 33(3), 2016, pp. 896–906, [CrossRef](#)
- [13] J. Ahrens, B. Geveci, C. Law, *ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization*, Visualization Handbook, Elsevier, 2005, ISBN-13: 978-0123875822, [CrossRef](#)

ABRAZÍV VÍZVÁGÁS NUMERIKUS MODELLEZÉSE

Hervai Dávid Dominik^a, Safranyik Ferenc^{b*}

^a ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, Gépészmérnöki BSc, 3. évf.

^b ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, egyetemi docens

ABSZTRAKT

Vizsgálatunk során az ipar számos területén alkalmazott abrazív vízvágással foglalkoztunk. A vizsgálat az említett megmunkálási eljárás során fellépő hibajelenségek tanulmányozására irányult. A munkánk célja az volt, hogy a megmunkálás során fellépő elhajlás jelenségét numerikus módszer segítségével modellezzük, majd a modellt összehasonlítsuk egy valós vágaton végzett mérések eredményeivel. A megmunkálás során nagy sebességek és elmozdulások lépnek fel, ezért explicit dinamikai modellt készítettünk, amelyben az abrazív sugarat SPH-, míg a lemezt hagyományos Lagrange-testként írtunk le. A szimulációt értékelve a modellen megfigyelhető a valóságban is fellépő vágási rés ferdesége, miszerint a belépő oldalon nagyobb átmérőjű a vágási rés, mint a kilépő oldalon.

Kulcsszavak: vízvágás, abrazív, SPH, oldalferdeség

1. Bevezetés

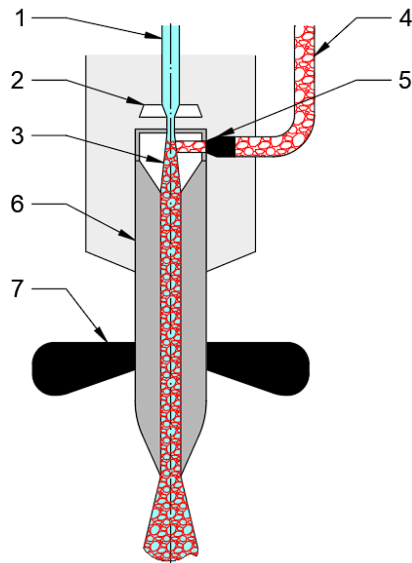
Az abrazív vízsugaras vágást elsőként az 1930-as években, a bányászatban alkalmazták, az általánosabb ipari szintű felhasználása az 1960-as években kezdődött [1]. Ez egy olyan korszerű technológia, ami a későbbiekben sokkal nagyobb jelentőséget kap az ipar számos területén, mert ahogy az ilyen típusú gépek fejlődnek, egyre szélesebb skálát fednek le a megmunkálható anyagok, valamint a megvalósítható termékek között. Mivel ez az eljárás korszerű, így rengeteg lehetőség rejlik benne, de ez magával hordozza azt is, hogy még viszonylag kevés az ehhez kapcsolódó szakirodalom, főleg az olyanok, amelyek az elméleti síkon megfogalmazott felvetések és a gyakorlati példák között teremtenek valamilyen kapcsolatot. Az eljárás elvét tekintve viszonylag egyszerű, azonban alkalmazása során figyelniük kell a technológiai paraméterek helyes megválasztására.

Az abrazív vízsugaras vágás anyagleválasztó eljárás, mert a vágási út mentén a sugár a munkadarabot „elkoptatja”. Megmunkáláskor egy igen kis átmérőjű és nagy nyomású víz vagy víz és kerámia szemcsék elegendőből álló sugár halad extrém nagy sebességgel (500-1 500 m/s) a megmunkálandó felület felé majd, amikor a felülettel találkozik, akkor azt elkoptatja. A vágott felület igen jó minőségű, bizonyos esetekben utómegmunkálás sem szükséges, illetve igen összetett geometriájú termékek is gyárthatók nagy sorozatban. A technológia felületi megmunkálásra is alkalmas, ilyenkor nem vágják át teljesen a nyers munkadarabot, hanem csak a felületét munkálják meg, pl. tisztítási célból. Tehát két esetet különböztetünk meg [1, 2]:

- vágási eljárások: a teljes anyagvastagságot munkáljuk meg;
- felület megmunkáló eljárások: csak egy adott vastagságot munkálunk meg.

A technológiának két alapvető változata van:

- tisztán vízsugaras megmunkálás WJ (WJ = water jet);
- abrazív vízsugaras megmunkálás, melyet tovább bonthatunk ASJ (szuszpenziós módszer, ahol a keverés a vágófejen kívül történik) vagy AWJ (a keveredés a vágófejben jön létre) eljárásokra.



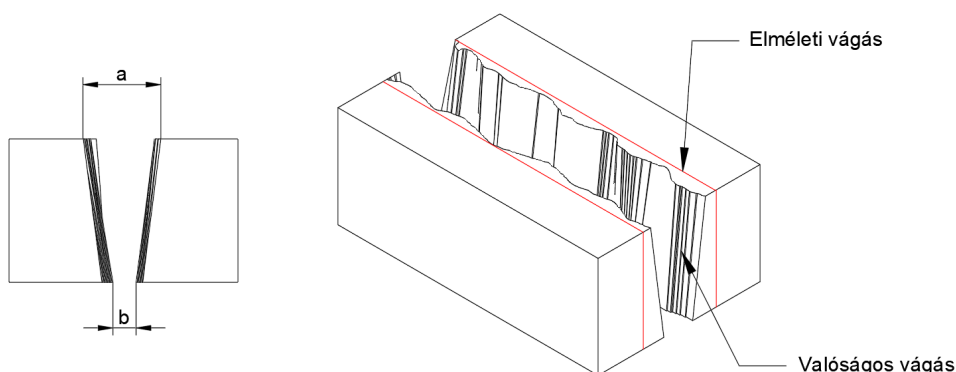
1. ábra: A vágófej metszete (AWJ kialakítás), részei: 1: nagynyomású víz, 2: fókuszáló, 3: keverőkamra, 4: abrazív szemcsék, 5: injektor, 6: fúvóka, 7: védősapka [1]

Az első esetben a sugár csak tisztán folyadékból áll (leggyakrabban vízből). A második esetben a vízsugárhoz adnak valamilyen abrazív (koptató) hatású szemcséket. A hozzáadott szilárd részecskék jelentősen növelik az eljárás termelékenységét. A megmunkálás során a megmunkáló gép típusától függően több fajta vágófej kialakítás létezik. A vágófej feladata a sugár megfelelő pozicionálása, fókuszálása (1. ábra) szükség esetén a keveredés biztosítása a víz és az abrazív szemcsék között [1].

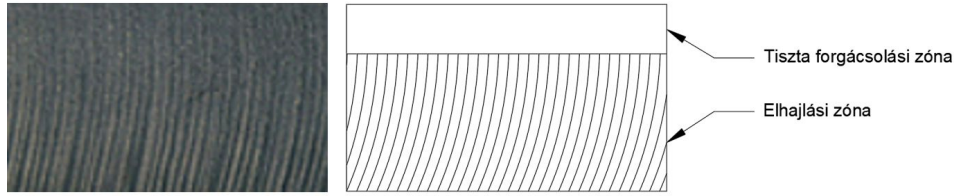
1.1. Technológiai problémák

A vágási rés alakja, hibái

Abrazív vízsugaras vágás során a sugár a nagy mozgási energiával érkezik a felületre, majd a vágás során, ahogy egyre beljebb hatol az anyagba, veszít az energiájából, ennek látható következménye is van. Az elméletileg tökéletes vágási képhez képest (ami tisztán egyenes oldalakat eredményez) jól látható, hogy a vágott felület közel sem egyenes, különböző egyenetlenségek vehetők észre, illetve az is látszik, hogy ahol a sugár belép az anyagba, szélesebb a vágás, mint ahol kilép. A felület esetleges egyenetlensége mellett, ez az egyik fő probléma, az úgy nevezett oldalferdeség (2. ábra). Az oldalferdeséget az egyszerűsítés miatt, ténylegesen úgy vesszük számításba, mintha a vágott oldalak bizonyos mértékben eltérnének a függőlegestől [2].



2. ábra: A vágási rés alakja [2]



3. ábra: Az elhajlás jelensége [3]

Az elhajlás jelensége

Mint minden forgácsoló megmunkálás esetén, itt is szükség van a munkadarab és a „szerszám” közötti elmozdulására (előtolásra). A megmunkálás akkor lehet a leggyorsabb, ha az előtolás értékét növeljük, hiszen egységnyi idő alatt nagyobb utat tesz meg a vágófej. Azonban a megmunkálás során, ahogy a sugár halad, két vágási zónát hoz létre a felületen. A felső részeken tiszta anyagleválasztás látható, azonban az alsóbb rétegekben, (az előző hibához hasonlóan) a sugár veszít az energiájából, ezért elhajlik, ami rosszabb vágási minőséget eredményez (3. ábra).

1.2. A folyamat modellezése

Az SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics, vagy magyarul: Simított Részecskés Hidrodinamika), egy Lagrange-féle, teljesen háló független módszer [3]. A módszer kifejlesztése Joseph J. Monaghan nevéhez fűződik, aki az asztrofizikában alkalmazta ezt a eljárást különböző csillagközi gázok viselkedésének modellezésére [4]. Mivel a módszer különálló elemek definiálásából adódóan igen jól alkalmazható különböző közegek áramlásának vizsgálatokor, ezért a vízvágás vizsgálatához is ideális, mert a folyadék és abrazív szemcse sugár tipikus áramlástani probléma. A módszer fontos tulajdonsága, hogy minden egyes elemet, adott tulajdonságokkal kell ellátnunk, pl. sűrűség, nyomás, tömeg, térbeli helyzet, sebesség stb. Ezeket a paramétereket minden időpillanatban ismerjük. Kezdetben mi határozzuk meg ezeket a paramétereket (pl. 0. időpillanatban), azonban az SPH módszer lényege, hogy folytonos függvények és deriváltjaik értéke diszkrét pontok felhasználásával közelíthető, ami annyit jelent, hogy egy adott elem aktuális tulajdonságait mindig a szomszédos részecskék pozíciójából és tulajdonságából számítjuk [5, 6]. Az SPH módszer egy olyan numerikus eljárás, melynek alapja az integrál-interpoláció. Mint minden interpoláció során, itt is egy függvénnyel keressük a megoldást, ebben az esetben ezt magfüggvénynek nevezik. A magfüggvény segítségével egy adott részecske közelében lévő szomszédos elemek fizikai tulajdonságait közelítjük. Ez az interpoláció az alábbi alakban írható fel tetszőleges A_I fizikai tulajdonságra vonatkozóan adott Ω tartományon [7]:

$$A_I(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} A(\mathbf{r}')W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h)d\mathbf{r}', \quad (1)$$

- ahol:
- \mathbf{r} , egy, az Ω tartományon belüli pont helyvektora,
 - \mathbf{r}' , a magfüggvényen belül lévő részecske helyvektora,
 - $A_I(\mathbf{r})$, tetszőleges fizikai mennyiség a hely függvényében,
 - W , a simító magfüggvény,
 - $W(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$, az $\varepsilon \mapsto 0$ sugarú Dirac-delta függvény,
 - h , a magfüggvény sugara, más néven a simító hosszúság.

Az egyenlet numerikus alakban:

$$A_s(\mathbf{r}) = \sum_j A_j \frac{m_j}{\rho_j} W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h), \quad (2)$$

ahol:

- j , a simító hosszúságon belül lévő részecskék indexe,
- m_j , a j -edik részecske tömege,
- ρ_j , a j -edik részecske sűrűsége,
- A_h , a magfüggvény értéke a j -edik részecske helyén.

1.3. Az SPH módszer alkalmazhatósága vízvágás modellezéséhez

Ma és szerzőtársai [8] azt vizsgálták, hogyan lehet a különböző numerikus eljárásokat alkalmazni az abrázív vágás modellezésére. Alkalmaztak Euler-féle megközelítést, klasszikus végeselemes modellt és SPH-VEM hibrid modellt. Az egyes módszerek különféle problémák megoldásához ideálisak.

Euler-Lagrange modell esetén lényegében a vágott anyagot hagyományos testként értelmezzük, és behálózjuk, valamint létrehozunk egy úgynevezett ellenőrző térfogatot, amiben a folyékony közeg áramlik (esetünkben víz). Előnye a módszernek, hogy a nagy sebességeket ugyan tudja kezelni, de a nagy deformációkat ebben az esetben már csak nehezen. Amennyiben az áramló közeg kilépne az ellenőrző térfogathoz, annak határán úgy viselkedne, mintha határoló felületnek ütközne, ami torzítaná az eredményeket. Az ellenőrző térfogatot természetesen lehet bővíteni, azonban ez a számítási kapacitás megnövekedését eredményezné, ezért ezt nem célszerű alkalmazni.

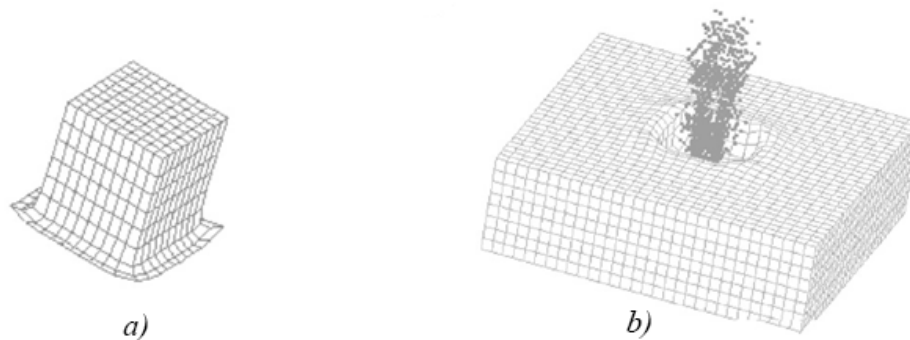
A második lehetőség a klasszikus VEM modell. Ennek előnye, hogy könnyű definiálni a geometriát és az anyagparamétereket, azonban a nagymértékű deformációt a háló torzulása miatt, már nem lehet kezelni (4/a ábra). A megmunkálás során a vízsugar jelentős deformációt szenved, így ennek a módszernek a használata sem célszerű.

A harmadik lehetőség az általunk is használt SPH-VEM hibrid modell, mely az előbbieken felsorolt módszerek előnyeit ötvözi, hiszen, ha a sugarat SPH modellnek vesszük, akkor az alkalmas a nagy deformációkra és sebességekre, míg a megmunkálandó lemez hagyományos VEM modellként felépítve is megfelelő (4/b ábra).

A szerzők munkája alapján tehát az abrázív vágáskor lejátszódó folyamatok modellezésére a hibrid SPH-VEM modell az egyik legjobb megoldás, mert nagy deformáció lép fel a sugárban, valamint a deformáció miatt a sugár elég nagy térfogatot betölt a vágás során (fröccsenő víz esete). A módszer másik előnye, hogy az anyagparaméterek és a geometria definiálása is viszonylag egyszerű.

1.4. Célkitűzések

A fentiek alapján célunk az, hogy az abrázív vízvágás során fellépő vágási rés hibát elfogadható hiba-határon belül modellezzük hibrid SPH-VEM módszerrel, annak érdekében, hogy később ezt tovább fejleszthessük, hogy a sugár haladását is vizsgáljuk, valamint a kapott eredményeket felhasználva, akár későbbi technológia optimalizálására használjuk az eredményeket.



4. ábra: a) A sugár nagy deformációja a VEM modellben, b) Sikeres szimuláció hibrid SPH-VEM modellen [8]

2. Lyukasztási folyamat SPH modellje

A modell elkészítésének fő alapelve az volt, hogy a lehető legegyszerűbb, azonban az elvárt pontosságnak megfelelő modellt válasszuk. A folyamatban két test szerepel, egyik a munkadarab (lemez), a másik a sugár.

2.1. A lemez anyagmodellje

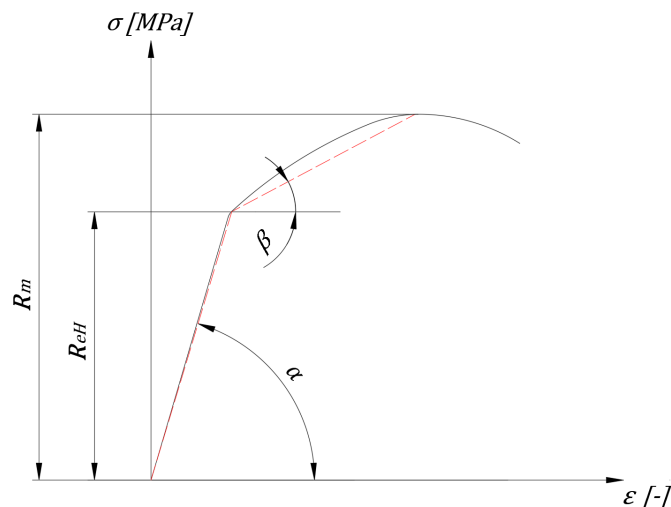
A munkadarab anyaga: AlMgSi0,5 ötvözet (EN AW 6060) [2]. Az anyagra jellemző többek közt: alumínium ötvözet, ezért könnyű, lágy, de a magnézium és szilícium segít a szilárdság növelésében, ezért jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, a környezet korrodáló hatásával szemben ellenálló [9]. Az anyagról több mechanikai tulajdonságot árul el a szakítódiagramja. Ezt a diagramot szakítóvizsgálattal veszik fel, amely során a fajlagos megnyúlást (ε) mérik a keletkező normál feszültség (σ) függvényében [10].

A bilineáris anyagmodell két lineáris szakaszból áll, amelyek segítségével figyelembe vehetjük az anyag képlékeny viselkedését. Az első szakaszon, a folyáshatár eléréséig lineárisan rugalmasan viselkedik, karakterisztikáját a függvény meredeksége, azaz a rugalmassági modulus írja le. A második szakaszon, az úgynevezett tangens modulus mutatja meg a várható maradó alakváltozás mértékét [11]. A két diagramot egymásra helyezve kapjuk meg az alábbi ábrát (5. ábra).

A bilineáris anyagmodell paramétereit:

- R_{eH} , a folyáshatár,
- $\text{tg}(\alpha) = E$, a rugalmassági modulus,
- $\text{tg}(\beta) = E_t$, az érintő modulus,
- ν , a Poisson-tényező.

Az anyagmodell mellett szükség van tönkremeneteli paraméterekre is, mert ezeknek az értékeivel tudjuk szabályozni azt, mikor következik be a tönkremenetel (mikor szakad meg az anyagfolytonosság). Alapvetően tudjuk, hogy egy anyag adott pontjában a tönkremenetel akkor következik be, ha az adott pontjában a redukált feszültség eléri a folyáshatárt [12]. A szimuláció során, ha az általunk megadott határértéket eléri bármelyik elem a keletkező legnagyobb főfeszültség, akkor azt töröljük. A másik ilyen jellemző a megengedett legnagyobb alakváltozás. Alapvetően, a maximális alakváltozás a teljes tönkremenetel előtt számítható, ezen érték ismeretében, meghatározhatunk egy olyan határ-alakváltozást, amelynél nagyobb alakváltozás esetén töröljük az adott elemet a hálóból. Az anyagjellemzőket a 1. táblázatban ismertetjük.



5. ábra: Alumínium szakítódiagramja (fekete) és a bilineáris anyagmodell (piros) [11]

1. táblázat: A lemez anyagmodelljének paraméterei [2, 13]

Paraméter	Értéke
Folyáshatár (R_{eH}), [MPa]	206
Rugalmassági modulus (E), [GPa]	69
Érintő modulus (E_t), [GPa]	0,32
Poisson-tényező (ν), [-]	0,3
Sűrűség (ρ), [kg/m ³]	2 800
Tönkrementeli főfeszültség ($\sigma_{1,max}$), [MPa]	250
Geometriai deformációs tényező (k), [-]	0,2

2. táblázat: Az abrazív sugár sűrűségének számításához használt paraméterek [2]

Paraméter	Víz	Abrazív szemcse
Sűrűség (ρ), [kg/m ³]	997	3 950
Anyagáram (W), [kg/s]	0,033	0,00333

2.2. Az abrazív sugár modellje

A sugár felépítését tekintve SPH modell. A legfontosabb tulajdonsága a sugárnak, hogy két anyagból tevődik össze (abrazív anyag és víz). A szimuláció során az egyszerűsítés miatt ezt egy anyagként kezeljük. A számításhoz a legfontosabb sugár paraméterek: a sűrűség és az anyagáram (2. táblázat). A sugár előállításához szűrt vizet, és GARNET80 típusú gránátport használtak a szerzők [2]. A szükséges átlagsűrűséget a tömegáram-arányok alapján számítottuk ki. A teljes anyagáram:

$$W = W_v + W_{sz} = 0,033 + 0,00333 = 0,03633 \text{ kg/s.} \quad (3)$$

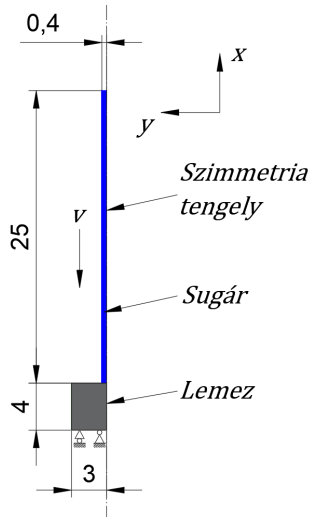
A tömegáram-arányok alapján a sugár átlagos sűrűsége számítható:

$$\rho = \frac{W_v}{W} \rho_v + \frac{W_{sz}}{W} \rho_{sz} = 1\,270 \text{ kg/m}^3. \quad (4)$$

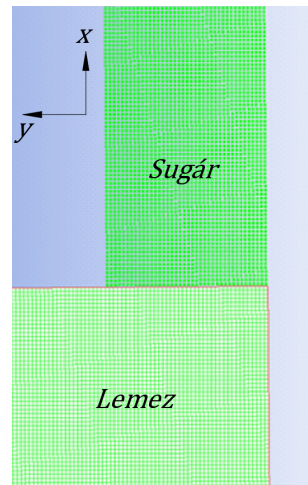
A sugár sűrűségét ennek megfelelően állítottuk be. Ez az egyik legfontosabb anyagjellemző, hiszen mozgási energiája révén alakítja a fémeket a sugár, ami elsősorban a sűrűségtől és a sebességtől függ. Ahogyan a lemez anyagmodelljénél is szükség volt tönkrementeli értékekre, úgy most is szükségünk van rá, ez esetünkben a nagy sebességű folyamatok modellezésénél használatos Rankine-Hugoniot állapotegyenlet [14]. Az állapotegyenlet értékeit az Ansys-Autodyn anyagkönyvtárából a víz tulajdonságaihoz rendelt értékekkel vettük figyelembe, itt két fontos érték szerepelt, a C_1 paraméter, melynek értéke 1 647 m/s, illetve az S_1 paraméter, melynek értéke 1,921 volt.

2.3. A geometriai modell

Alapvetően két geometria szükséges, az egyik a lemez, amit vágni szeretnénk, ez a korábban bemutatott alumíniumból készült, vastagsága 4 mm volt. A sugár fontos tulajdonsága a sugárátmérő, amelyet alapvetően a fúvóka geometriája határoz meg. A geometriai ismertetéséből észrevehetjük, hogy szimmetrikus feladattal állunk szemben. Ezen okok miatt, a feladatot kétdimenziós, tengelyszimmetrikus problémaként modelleztük. Ezzel a módszerrel két téglalapra egyszerűsödik a geometria. A felsorolt egyszerűsítéseket alkalmazva, a lemezkorongot modellező felület 3x4 mm, míg a sugár 25 mm hosszú és 0,4 mm sugarú. A sugár távolsága a darabtól a kezdeti pillanatban 0,001 mm (6. ábra). A geometriai modellt Ansys Autodynben készítettem el (kék: sugár, szürke: lemez).



6. ábra: A geometriai modell



7. ábra: A részekre osztott geometria

2.4. Diszkretizálás

A végeelem szoftverek esetében kulcsfontosságú kérdés az úgynevezett hálózás. Ennek során határozzuk meg, hogy egy adott geometriát hogyan diszkretizálja a szoftver. Esetünkben két különböző numerikus modell is van, a lemez és a sugár. A vízszög a jellegéből adódóan SPH modell, ezért a két modell esetén más-más paramétereket kell megadnunk. Az általunk használt paramétereket a 2. táblázat tartalmazza. A numerikus megoldás előállításához szükséges a geometriát részekre osztani (diszkretizálni), valamint az így elkészült hálót a kritikus zónákban finomítani. Esetünkben a geometria tengelyszimmetrikus egyszerűsége miatt elég volt a lemez esetén lineáris közelítésű négyzet alakú, megegyező elemeket, a sugár esetén pedig ugyanilyen méretű SPH részecskéket alkalmazni (7. ábra). A lemezt 47 241 db, lineáris közelítésű, négyzet alakú, 0,015 mm élhosszúságú elemekre, míg a sugarat 23 409 db, 0,015 mm átmérőjű SPH részecskére osztottuk fel.

Korábban ismertettük az SPH módszert, ennek a megoldásnak fontos paramétere, a h simítóhossz, amelyet előzetes számítások alapján 0,001 mm-re vettük fel. A simítóhossz mellett a szimuláció jellegéből adódóan szükséges az időlépték definiálása. Az explicit időintegrálásos megoldás során a szimulációs időléptéket a számítási algoritmus, a rendszer energiaszintje alapján határozta meg, amely nem lehetett nagyobb 10^{-3} ms-nál. Jellemző értéke a szimuláció során $4,510^{-7}$ ms volt.

2.5. Peremfeltételek

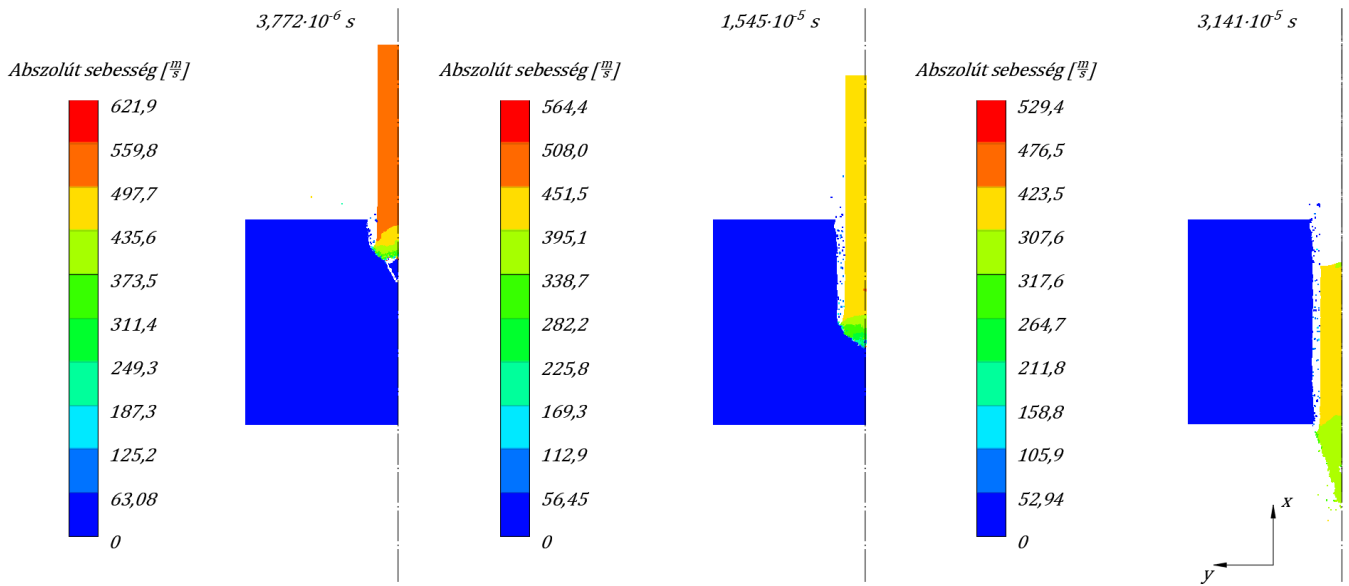
Esetünkben két alapvető kényszert határozhatunk meg. Az első, hogy a lemez fix pozícióban maradjon, hiszen a megmunkálás során nem mozog. Ehhez a sebességet minden irányban 0-ra állítjuk, így a szimuláció során a darab nem mozdul el. A sugár fő paramétere a nyomása, ezt azonban nem tudjuk közvetlenül beállítani, de a nyomásból számolhatunk sebességet. A sebességet az alábbi összefüggéssel lehet számolni [2]:

$$v = \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \quad (5)$$

ahol:

- μ , a veszteségi tényező (értéke 0,83 és 0,93 közötti),
- p , az alkalmazott nyomás,
- ρ , a sugár sűrűsége.

Esetünkben a nyomás 300 MPa, a kilépő sugár sűrűsége $1\,270 \text{ kg/m}^3$, a veszteségi tényező pedig 0,88. Ezek alapján a sugár kezdeti sebessége 604,86 m/s.



8. ábra: A sugár haladása az egyes időpillanatokban

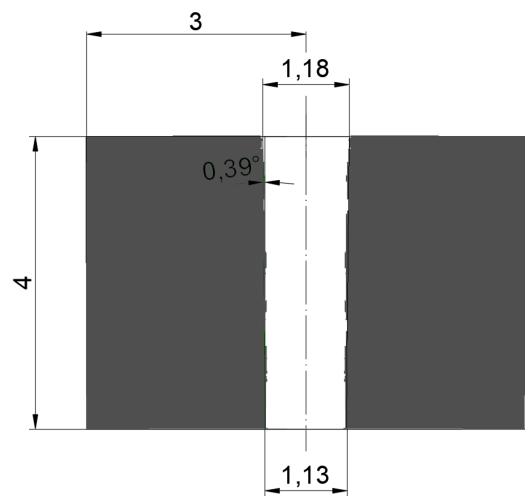
3. Eredmények

A szimulációt elvégezve értékelhető eredményt kaptunk, amin a geometriai méréseket el tudtuk végezni, így össze lehetett hasonlítani a valós lemezvágással [2]. A szimuláció során a sugár haladását figyelve látható, hogy ki- és belépéskor hogyan viselkedik az anyag. A szimuláció során lehetőségünk volt, hogy adott időközönként, a szoftver mentse el az adott állapotot, így nem csak a végeredményt láthatjuk, hanem köztes időpillanatokban is vizsgálható a vágórés (8. ábrán). Az ábrán továbbá nyomon követhető, ahogy a sugár folyamatosan energiát vesz, és ezáltal csökken a sebessége.

A szimuláció fő célja a vágási rés alakjának modellezése majd hitelesítése. A valóságban ugyanilyen feltételek mellett kapott vágási rés alakját a (9. ábra) szemlélteti [2]. Ezt hasonlítottuk össze a szimulációs eredményekkel (10. ábra). A numerikus számítással kapott vágórés szélessége a belépő oldalon 7,1%-kal, míg a kilépő oldalon 7,4%-kal tér el a valós méretektől. A vágórés számított ferdesége pedig 14,7%-kal nagyobb a mért értéknél.



9. ábra: A vágási rés a valóságban [2]



10. ábra: A szimuláció eredménye

4. Következtetések

A kapott eredményeket értékelve úgy gondoljuk, hogy sikeresen le tudtuk modellezni az abrázív lyukasztási folyamatot. A szakirodalomban [2] leírt kísérletek eredményeit elfogadható hibával tudtuk reprodukálni, mert a 3 eredmény közül két esetben 10%-nál kisebb hibával, míg az oldalferdeség esetén 15%-nál kisebb hibával sikerült közelíteni a valós méréseket, tehát a modellezésünk sikeresnek tekinthető. A számítás során láthatóvá vált, a haladás során, hogy amint egyre mélyebben hatol az anyagba a sugár, úgy csökken a keresztmetszete, ezzel okozva a ferdeséget (8. ábra). Mivel az abrázív sugárral történő lyukasztás folyamatát elfogadható pontossággal le tudja írni az általunk készített modell, így lehetőségünk van annak kiterjesztésére a vágási folyamatra. A kiterjesztés során az itt meghatározott eredményeinket felhasználva szeretnénk a sugár haladását vizsgálni az anyagban (pl.: egyenes vagy ívelt vonal mentén). Ezáltal egy komplexebb modell segítségével a valós vágási folyamat modellezése is kivitelezhető, amely alkalmas lehet a technológiai paraméterek optimalására is.

5. Köszönetnyilvánítás

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

6. Irodalomjegyzék

- [1] Bíró Sz., *Különleges technológiák*, egyetemi jegyzet, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, 2020.
- [2] Maros Zs., *Az abrázív vízszugaras vágás minőségének és hatékonyságának vizsgálata*, doktori értekezés, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolc, 2011.
- [3] M. Kelager, *Lagrangian Fluid Dynamics Using Smoothed Particle Hydrodynamics*, Department of Computer Science University of Copenhagen, Kopenhagen, 2006.
- [4] J.J. Monaghan, *Smoothed Particle Hydrodynamics*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics 30, 1992, pp. 543-547, [CrossRef](#)
- [5] Tóth B., Szabó K.G., *Szerkezetek lökésszerű hidrodinamikai igénybevételének numerikus modellezése SPH-val*, tudományos diákköri dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2012.
- [6] Tóth B., *Sekélyvízű tavak szélkeltette áramlásának modellezése hálómentes módszerrel*, Hidrológiai Közlöny, 2018, [url](#)
- [7] M. Vesterlund, K. Holmlund, *Simulation and Rendering of a Viscous Fluid using Smoothed Particle Hydrodynamics*, diplomamunka, Umea Universitet, Umea, 2004, [url](#)
- [8] L. Ma, R. Bao, Y. Guo, *Waterjet penetration simulation by hybrid code of SPH and FEA*, International Journal of Impact Engineering 35(9), 2008, pp. 1035-1042, [CrossRef](#)
- [9] Zsoldos I., *Korszerű szerkezeti anyagok: Alumínium és ötvözetek*, egyetemi jegyzet, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2013.
- [10] Lovas J., Krállics Gy., *Mechanikai Anyagvizsgálat*, egyetemi jegyzet, Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest, 2004.

-
- [11] J. Huopana, M. Taborelli, *Design of Precision Alignment of Compact Linear Colliders Accelerating Structures*, diplomamunka, University of Oulu, Oulu, 2009.
- [12] Égert J., Jezsó K., *Mechanika*, egyetemi jegyzet, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2006.
- [13] A. Verelst, *ALLOY DATA SHEET EN-AW 6060[AlMgSi]*, Nedal Aluminium BV, Utrecht, 2017.
- [14] A.A. Lukyanov, *An Equation of State for Anisotropic Solids under Shock Loading*, The European Physical Journal B 64, 2008, pp. 159-164, [CrossRef](#)

SODRONYKÖTÉL ANYAGMODELLJÉNEK KIDOLGOZÁSA

Jánoki András^a, Safranyik Ferenc^{b*}, Kollár László^c

^a ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, Gépészmérőki BSc, 3. évf.

^b ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, egyetemi docens

^c ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, egyetemi tanár

ABSZTRAKT

Munkánk fő célja acélsodrony mechanikai tulajdonságainak vizsgálata. Ennek megvalósításához univerzális anyagvizsgáló géphez csatlakoztatható befogókészüléket terveztünk. Elsőként 3D modellező szoftver segítségével megterveztük a befogó készüléket, amit végeelem módszer segítségével szilárd-ságtanilag ellenőriztünk. Ez a készülék a kötélcsúrlódás elvén működik és a kereskedelmi forgalomban kapható befogók tulajdonságait ötvözi. Ennek segítségével 4 mm névleges átmérőjű, korrózióálló acélsodronyokat vizsgáltunk. Ez alapján meghatároztuk a vezeték szakítási szilárdságát és közelítő anyagmodelljét.

Kulcsszavak: sodronykötél, anyagvizsgálat, anyagmodell, VEM

1. Bevezetés

Napjainkban a hideg éghajlati övezetben lévő területeken nagy problémát jelent az elektromos vezetékeken kialakuló jég- és hóréteg. Ezek az időjárási tényezők statikus igénybevétellel terhelik a vezetéket, majd olvadáskor a hirtelen leeső tömeg rezgésbe hozza a kábeleket, dinamikus igénybevételnek teszi ki őket. A hosszabb vezetékek esetén méteres kilengések is előfordulnak ezek pedig az esetek egy részében tönkremenetelhez vezetnek. A jelenleg is alkalmazásban lévő távtartók páros vagy négyes kábel csoportok esetén csökkentik a kilengések nagyságát, de ez nem szünteti meg teljesen a problémát és nem megoldás az önmagában futó vezetékekre [1].

Ezek a távvezetékek készülhetnek tömör és sodrott kivitelben. Általában az utóbbi kialakítást használják, mivel jobban ellenáll a többszöri hajlításoknak (1. ábra). Mechanikai tulajdonságok javítása érdekében sodrott szálak további sodrott elemi szálakból tevődnek össze. A réz és alumínium sodronyok helyett, néha acél erősítéses vagy teljesen acél alapanyagú vezetékeket készítenek [2]. Ezen tulajdonságok ellenére is fennáll a tönkremenetel esélye a szélsőséges körülmények között [3].



1. ábra: Acélsodrony

A tönkremeneteli jelenség megértéséhez analitikus és numerikus modelleket is alkalmaznak a kutatók. A kutatásokban sokszor vizsgálják az elemi szálak kapcsolatát és a modell egyszerűsítésének lehetőségeit [3]. Mindkét modellhez először szükséges, hogy megismerjük a kábel viselkedését leíró anyagjellemzőket. Munkánk fő célja az elektromos vezetéként használt acélsodrony anyagmodelljének meghatározása anyagvizsgálatok alapján. Ehhez olyan befogókészüléket kellett tervezni, amely a Savaria Műszaki Intézetben rendelkezésre álló univerzális anyagvizsgáló berendezéshez illeszthető és alkalmas acélsodronyok rögzítésére.

Legfőbb szempontok a tervezéskor a költséghatékonyság, az egyszerű gyártás, könnyű szerelhetőség és a szakítógép maximális teljesítményének kihasználhatósága volt. Tanulmányoztuk a jelenleg használatban lévő konstrukciók egy részét. Ezek alapján több modellt készítettünk, amiket végeelem-módszer segítségével ellenőriztünk és a kapott eredmények alapján optimalizáltunk, így a befogó legyártása után lehetőségünk nyílt a vizsgálatok elvégzésére. Második lépésként a vezetékeken végzett mérésekből származó adatok alapján meghatároztuk a sodrony anyagmodelljét.

2. Befogókészülék tervezése

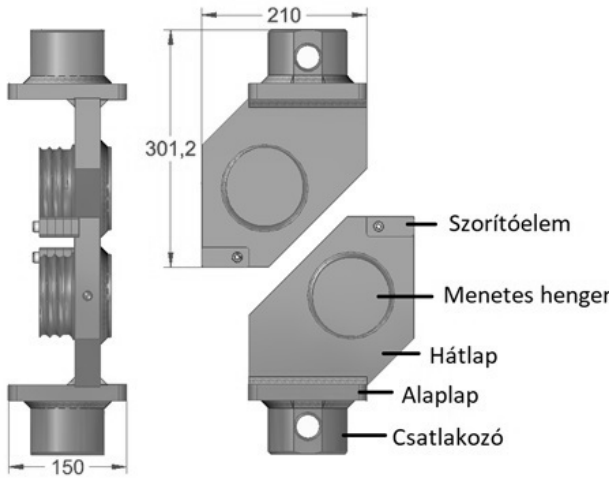
A befogó megtervezése előtt három már kereskedelmi forgalomban kapható kivitel hasonlítottunk össze. Ezek mind a kötélúrlódás elve alapján működnek, ám a kábelvég rögzítése más-más módon történik. Az általunk tervezett befogó fő célja a 13 mm-es átmérőjű vezeték megfelelő rögzítése a szakítóvizsgálat során. Ezenkívül fontos volt, hogy a készülék csatlakoztatható legyen az egyetemen található univerzális anyagvizsgáló géphez és le tudjuk gyártani az egyetem gyártástechnológia laboratóriumában.

A funkcionális tervezést a Solid Edge 2020 3D tervező program segítségével végeztük. A sodrony rögzítését egy menetes henger teszi lehetővé, amire 2,5 menetet lehet felcsavarni így elég nagy az átfogási szög ahhoz, hogy megfelelően rögzíteni lehessen a sodronyt. A vezeték végének a rögzítését egy szorító pofa segítségével oldottuk meg, amit egy csavar szorít a másik pofához. A kötélúrlódás összefüggése alapján meghatározható a rögzített kötélagban ébredő erő és ezáltal a szükséges csavar mérete, amely biztosítani tudja a szükséges szorítást. A húzóerőt a készüléken vizsgálható legnagyobb, 13 mm átmérőjű vezeték elszakításához szükséges erő alapján határoztuk meg, ami $F_h = 75\,000\text{ N} = 75\text{ kN}$ nagyságú. A nyugvásban lévő súrlódási tényezőnek pedig a szakirodalomban megtalálható, acél-acélsodrony érintkezéshez tartozó értéket használtuk [4]. Ezek alapján a rögzített ágba fellépő erő:

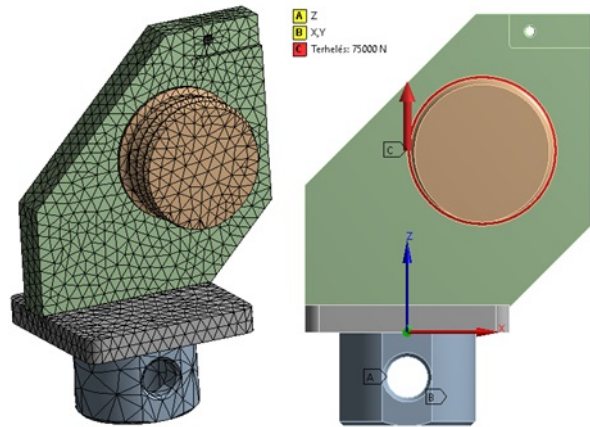
$$F_r = \frac{F_h}{e^{\mu_0 \alpha}} = 3\,241,04\text{ N}, \quad (1)$$

ahol: - $\mu_0 = 0,2$, a nyugvásban lévő súrlódási tényező [4],
- α , az átfogási szög radiánban.

A kötélagban számított erő alapján 10.9 szilárdsági osztályú M8 névleges méretű csavart alkalmaztunk a kábelvég rögzítésére. A készülék rögzítőfelülete a szakítógép csapjának méretei alapján készült úgy, hogy a befogó könnyen cserélhető legyen (2. ábra). A 3D modellt felhasználva a végeelemes ellenőrzéseket az Ansys szoftver statikus szerkezeti modulja segítségével végeztük [5]. Ennél a vizsgálatnál hegesztéseket nem ábrázoltuk a modellen és mivel a szorítóelem nem teherviselő így azt sem vettük figyelembe. 75 kN nagyságú terhelő erő a huzalon keresztül, a húzási egyenesben, hat a menetes henger első beszúrására. Ezt az erőt távoli erő lehetőséggel definiáltuk a húzási egyenesben. Az iránya a pozitív z tengely felé mutat. Valóságban a készülék egy csapra van felhúzva, így az x és y irányú elmozdulását az ezzel érintkező felületen korlátoztuk. A z irányú rögzítésért a csatlakozón átmenő csap felel, így furatának függőleges irányú elmozdulását korlátoztuk (3. ábra). Három kontakt beállítást alkalmaztunk a vizsgálat alatt ezek mind nyomatékbíró merev kényszerkapcsolat típusúak, amelyek nem engedik az alkatrészek elcsúszását és elválását. Ezeket a hegesztési varratok helyettesítésére alkalmaztuk. A hálózaskor 10 mm nagyságú, elsőfokú közelítésű, tetraéder alakú elemeket



2. ábra: A befogókészülék háromdimenziós modellje és befoglaló méretei mm mértékegységben



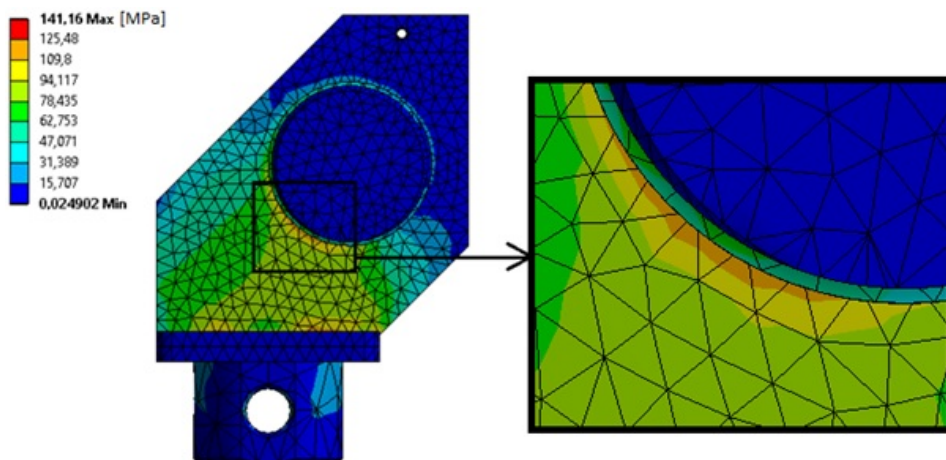
3. ábra: Végeselemes háló és peremfeltételek

alkalmaztunk, így 38 222 csomópontszámot és 23 515 elemszámot kaptunk. Ezekkel a beállításokkal elvégzett vizsgálatból azt kaptuk, hogy a legnagyobb redukált feszültség a hátlap és a menetes henger kapcsolatánál keletkezik az éles sarokban, ennek értéke 141,16 MPa (4. ábra).

A készülék valamennyi alkatrészét C45 minőségű szerkezeti acélból gyártottuk, amelynek folyáshatára (R_{eH}) az előgyártmány méretei alapján 370 MPa. Vizsgálat során lineáris anyagmodellt használtunk, amihez 200 GPa értékű rugalmassági modulust és 0,3 értékű Poisson-tényezőt állítottunk be [6]. A legnagyobb szerkezeti feszültség $\sigma_{red,max} = 141,16$ MPa, amelyek alapján biztonsági tényezőt számoltunk:

$$n = \frac{E_{eH}}{\sigma_{red,max}} \approx 2,6. \tag{2}$$

A fenti biztonsági tényező elfogadható, illetve mivel a maximális szerkezeti feszültség az éles sarokban ébredt, valóságban ennek értéke várhatóan kisebb lesz, a homorú hegesztési varrat feszültségcsökkentő hatása miatt. Végezetül a tervek és ellenőrzések alapján legyártottuk a befogókészüléket. Korrózióvédelemnek festést alkalmaztunk. Funkcióját tökéletesen ellátja és ezzel lehetőségünk nyílik kötéll, huzal és fonal minták anyagvizsgálatára (5. ábra).



4. ábra: HMH-féle redukált feszültségek

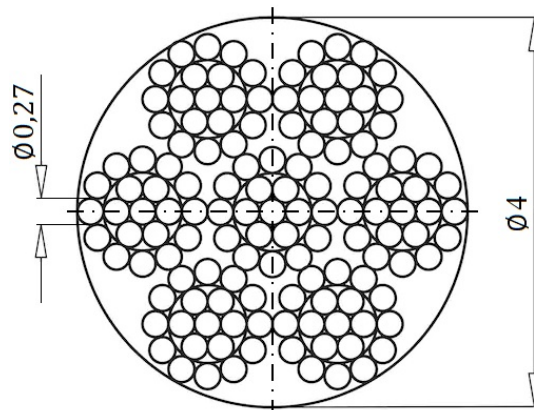


5. ábra: Az alkatrészek hegesztés előtt és az elkészült befogókészülék

3. Kísérleti vizsgálatok

Az elkészült befogóval összesen 5 db mintán végeztünk anyagvizsgálatot. A vizsgálatokhoz az egyetemen található Zwick/Roell z100 típusú szakítógépet használtuk. Pontossága 0,2 kN – 1 kN között a mért érték 1%-a, 1 kN felett pedig a mért érték 0,5%-a. DIN3060 szabványú T7x19 méretű, 4 mm névleges átmérőjű, korrózióálló acélsodronyt használtunk az anyagvizsgálatokhoz. Ezeket az elnevezésből is meghatározhatóan 7 kisebb 19 szálból álló sodrott huzalból sodorták össze (6. ábra). Köré írható kör névleges átmérője 4 mm. A legkisebb szál kerekített átmérője pedig 0,27 mm. Korrózióálló acélsodronyok szakítószilárdsága a szabvány szerint 1 570 MPa [7].

Mérési folyamat szempontjából fontos volt olyan hosszúra hagyni a kábeleket, hogy a két befogó között elférjen a mechanikus nyúlásmérő is, aminek segítségével mértük az alakváltozást. A kábel rögzítésekor fontos a kellő odafigyelés mivel rossz feltekerés esetén a szálak folyamatosan rendeződnek és csúsznak a készülékben, így hibás mérést eredményezve. Mindemellett arra is ügyelni kell, hogy a szorító pofán túl bőven legyen kábel mivel, ha a vezetékeket a végén fogjuk be, akkor a húzóerő hatására a kisebb szálak elkezdnek egymásról letekeredni így kilapul a keresztmetszet, aminek következtében elmozdul a rögzítésből a vezeték. Ilyenkor a mérési diagramon látható, hogy nem növekszik az erő és a kábel végén, mivel az elemi szálak szétbomlanak. A probléma a sodrony végére roppantható menetes véggel vagy megfelelő kinyúlási hossz alkalmazásával kiküszöbölhető. A megfelelő



6. ábra: Vezeték és elemi szál keresztmetszete [8]

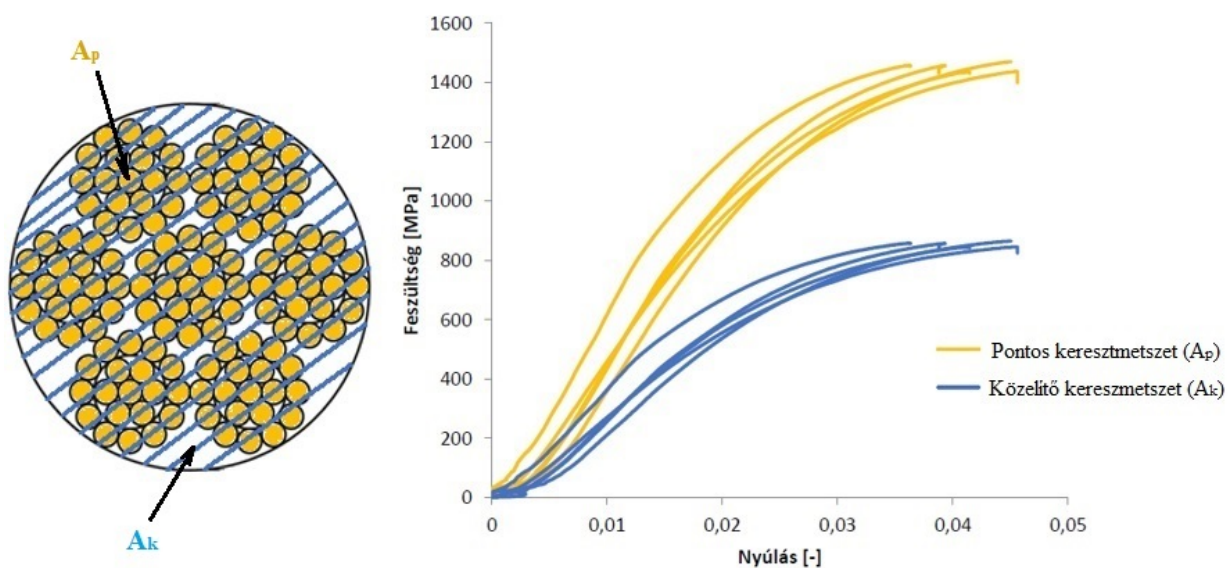


7. ábra: Acélsodrony mérés közben és a tönkremenetel után

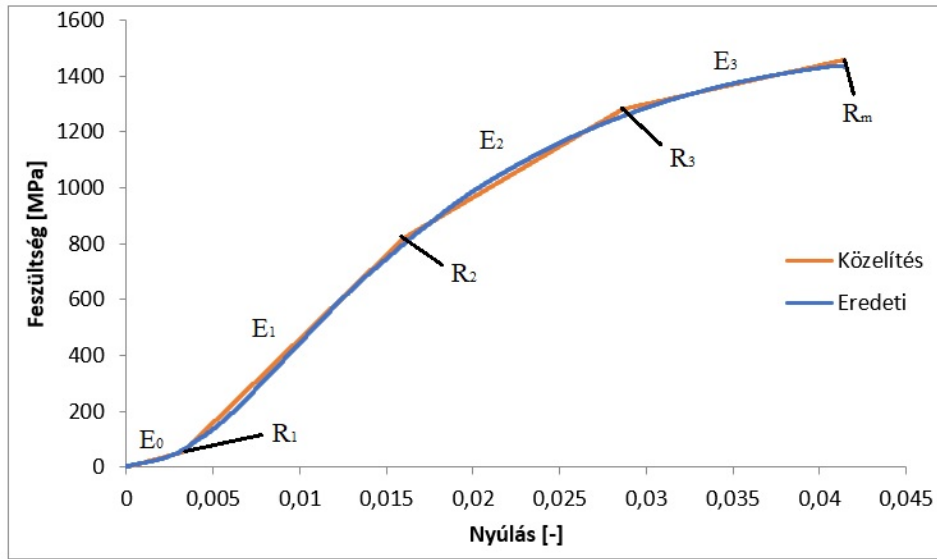
befogás után a két befogót 5 mm/min-es sebességgel mozgattuk el egymástól. A szakítási folyamat végén megfigyelhető, hogy nem szakad el egyszerre az összes szál, bár ez várható volt a többszörösen összetett szerkezeti kialakítás miatt (7. ábra).

4. Eredmények és következtetések

A szakítóvizsgálat során megkapott adatokból megállapítható, hogy az elvégzett vizsgálatok között kicsi a szórás és közel egyformák a szakító diagramok (8. ábra). Méréseink alapján a sodronykötél szakítószilárdsága $1451,8 \pm 29$ MPa (95,4%-os valószínűséggel). A várható érték csupán 7,6%-kal tér el a DIN 3060 szabványban szereplő 1 570 MPa-os értéktől. Ezekből következik, hogy a befogókészülék megfelelően használható és a mérési módszer alkalmas sodronykötelek vizsgálatára. Kapott adatokból további vizsgáltuk annak fontosságát, hogy a kábel keresztmetszetét lehet-e helyettesíteni a befoglaló kör területével. A sodronyt alkotó elemi szálak köré írható kör területe $A_k = 12,57$ mm². Ez jelentősen nagyobb a vezeték pontos keresztmetszetének területénél, ami $A_p = 7,61$ mm² (8. ábra). Ezt úgy kapjuk meg, ha összeadjuk a legkisebb elemi szálak keresztmetszetének területét. Ebből



8. ábra: Vezetékben ébredő feszültség a pontos és közelítő keresztmetszet alapján



9. ábra: Szakítógörbék közelítése és a közelítés jellegzetes pontjai a valós keresztmetszet alapján

már látszik, hogy a két értékkel végzett számítások teljesen más eredményre vezetnek. Ezekkel a számokkal készítettük el a vezetékek feszültség nyúlás diagrammját, amiről egyértelműen megállapítható, hogy jelentős különbségek vannak és a későbbi vizsgálatokat fontos a pontos keresztmetszettel végezni (8. ábra).

Innentől fogva az elemzéseket, csak a pontos keresztmetszetre terjesztettük ki. Következő lépésként az adatokból kapott görbéket 4-4 lineáris trendvonalal közelítettük hasonlóan Thoeni és szerzőtársai munkájához [9]. Ezek segítségével meg tudtuk határozni a görbe különböző szakaszaira jellemző merevséget. Erre a kábel későbbi végeeselemes modellezésénél a megfelelően pontos anyagmodell beállítása végett van szükség (9. ábra). A számozott R betűk a lineáris egyenesek metszés pontjai, a számozott E betűk pedig egyes szakaszok merevedését jelölik. Ez a merevedés az egyes szakaszokhoz tartozó merevségeket jelenti. Az R_m az a pont, ahol vizsgálat során a vezeték elszakadt. Ebből adódóan ennek a pontnak a feszültség értéke a vezeték szakítószilárdságával egyezik meg.

5. Összefoglalás

Tervezés és VEM vizsgálatok után sikeresen legyártottuk a befogót, ami 0-13 mm átmérőjű vezetékek vizsgálatára alkalmas, 75 kN-os terhelésig, 2,6-os biztonsági tényezővel. Ezután szakítóvizsgálatokat végeztünk és a kapott adatokból megállapítottuk, hogy befoglaló kör területével számolt feszültségek nagyban eltérnek a pontos területtel számítottól. A vezetékek 3,5-4,5%-os alakváltozás után

1. táblázat: Mérési adatok és eredmények

	1. mérés	2. mérés	3. mérés	4. mérés	5.mérés	Átlag	Szórás
E_0 [GPa]	16,56	17,46	48,07	14,26	25,13	24,30	13,91
E_1 [GPa]	61,18	56,76	68,07	63,20	54,28	60,70	5,42
E_2 [GPa]	36,50	34,35	38,37	34,90	31,48	35,12	2,57
E_3 [GPa]	14,47	14,32	15,21	13,37	11,49	13,77	1,44
R_1 [MPa]	54	79	87	51	71	68,4	15,61
R_2 [MPa]	799	967	847	899	869	876,2	62,51
R_3 [MPa]	1 289	1 286	1 332	1 393	1 315	1 323	43,50
R_m [MPa]	1 435	1 470	1 458	1 457	1 439	1 451	14,52

szakadnak el, miközben átlagosan 1 451,8 MPa feszültség ébred bennük. Ezek az eredmények a szabványban és a gyártók által megadott adatokkal összhangban vannak, így megállapítható, hogy a mérések sikeresek voltak.

6. Köszönetnyilvánítás

Jelen kutatás az EFOP-3.6.1-16-2016-00018 „A felsőoktatási rendszer K+F+I szerepvállalásának növelése intelligens szakosodás által Sopronban és Szombathelyen” című projekt keretein belül valósult meg.

7. Irodalomjegyzék

- [1] L.E. Kollár, M. Farzaneh, *Vibration of Bundled Conductors Following Ice Shedding*, IEEE Transactions on Power Delivery 23(2), 2008, pp. 1097-1104, [CrossRef](#)
- [2] W.K. Lee, *An insight into wire rope geometry*, International Journal of Solids and Structures 28(4), 1991, pp. 471-190, [CrossRef](#)
- [3] G. Kastratović, N. Vidanović, *3D finite element modeling of sling wire rope in lifting and transport processes*, Transport 30(2), 2015, pp. 129-134, [CrossRef](#)
- [4] M. Csizmadia Béla, Nándori Ernő, *Mechanika Mérnököknek: Szilárdságtan (második kiadás)*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest-Gödöllő-Győr, 2002.
- [5] *Ansys® Academic Research Mechanical*, Release 16.0, 2016
- [6] H. Mouradi, A.E. Barkany, A.E. Biyaali, *Steel wire ropes failure analysis: Experimental study*, Engineering Failure Analysis 91, 2018, pp. 234-242, [CrossRef](#)
- [7] DIN 3060:1972, *Acélsodronykötelek*
- [8] *Würth szereléstechnika*, letöltés dátuma: 2021. 01. 20, [url](#)
- [9] K. Theoni, C. Lambert, A. Giacomini, S.W. Sloan, *Discrete modelling of hexagonal wire meshes with a stochastically distorted contact model*, Computers and Geotechnics 49, 2013, pp. 158-169, [CrossRef](#)

3D NYOMTATOTT RÉTEGEK KÖZÖTTI ADHÉZIÓ KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

Magyarics Norbert^a, Safranyik Ferenc^{b*}, Andó Mátyás^b

^a ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, Gépészmérnöki BSc, 3. évf.

^b ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, egyetemi docens

ABSZTRAKT

A gyors prototípusgyártással kialakított alkatrészek gyakorlati alkalmazása alapján azok réteges felépítése befolyásolja mechanikai tulajdonságait. Ahhoz, hogy a műszaki számítások során figyelembe tudjuk venni ezt a heterogén felépítést, elengedhetetlen a rétegekre-, és azok összekapcsolódására jellemző mechanikai tulajdonságok ismerete. A rétegek közt kialakuló adhézió kísérleti vizsgálatához különböző, szabványos próbatestek vizsgálata után egyedi mérő készüléket terveztünk. A fejlesztéshez végelem analízist alkalmaztunk a számunkra ideális kialakítás érdekében. A készülék működőképességét a kontúrvonalszám teherbírásra gyakorolt hatását vizsgáló mintakísérlettel bizonyítottuk. Ez alapján megállapítottuk a rétegek közti adhézió nagyságát, illetve megvizsgáltuk, hogy adott kitöltési mód esetén hogyan kell figyelembe venni a próbatest keresztmetszetét.

Kulcsszavak: *adhézió, FDM, FFF, nyírás*

1. Bevezetés

A 21. században népszerűvé és elérhetővé vált a 3D nyomtatás a végfelhasználók számára is. Kutatások, korai projektek már az 1980-as évektől léteznek a témában, de a napjainkban elterjedt a rétegenként felépítő, ráolvasztásos elven működő, úgynevezett FDM (Fused Deposition Modeling) eljárást 1992-ben a Stratasys cég fejlesztette ki [1]. Az eljárás gyors prototípusgyártásra, egyedi alkatrészek pótlására, vagy akár dísz tárgyak készítésére is alkalmazható, már otthoni körülmények között is [2]. Magyarországon 2010-2012-től lehet otthoni, elérhető árú 3D FDM polimer nyomtatókat vásárolni.

Az FDM technológia lényegében rétegek egymáshoz kapcsolásából épít fel tárgyakat, néhány tized milliméteres rétegvastagságokkal. A hőre lágyuló polimer alapanyag megolvad és nyomás hatására kiáramlik egy fűvőkán. A megolvadt anyagból, ömledékből a gép vonalakat húz a fűvőka alatti síkra, legyen az a tárgyasztal vagy egy korábbi réteg. Az egy síkba húzott vonalak összessége alkot egy réteget. Az egymás mellé húzott vonalak kapcsolódnak - részleges megolvadással - a korábbi vonalához, illetve az alattuk található réteghez, melyek között adhéziós kapcsolat alakul ki [3]. Mind a technológia, mind az alkatrészek műszaki jellemzői számos kérdést vetnek fel.

Az FDM technológiával gyártott alkatrészek heterogén szerkezeti felépítése miatt különböző igénybevételek esetén nem alkalmazhatók megfelelő pontossággal a klasszikus tönkremeneteli elméletek. A kompozitszerkezetek mechanikai tulajdonságainak becslésére alkalmazott homogenizációs eljárások, mint például a Halpin-Tsai egyenlet [4], sem lehetnek célravezetőek, mivel azokkal a speciális tönkremeneteli folyamatok (mint a rétegek szétválása) nem kezelhetők. A modern, numerikus eljárásokkal (mint a végelem módszer) a réteges testek speciális tönkremeneteli folyamatai jól közelíthetőek, amit hagyományos kompozitok esetén már számos kutató bizonyított [5]. Ebből kiindulva a munkánk célja az FDM eljárással gyártott alkatrészek tönkremenetelének olyan numerikus modellezése,



1. ábra: Az átlapolt próbatestek nyírési vizsgálata

amely során a tárgyat felépítő rétegek szétválnak. Első lépésként a különböző technológiai paraméterek, rétegek közötti adhézióra gyakorolt hatásának kísérleti vizsgálatát végeztük el. Ehhez a Savaria Műszaki Intézetben található univerzális anyagvizsgáló berendezéshez egy olyan nyírókészüléket terveztünk, amellyel a nyomtatott alkatrészek rétegei közötti adhézió vizsgálható, majd mérések sorozatával feltérképeztük a nyomtatási paraméterek és a rétegeket összetartó erő közötti kapcsolatot.

2. Előkísérletek

Az adhézió vizsgálatához készített próbatestek anyaga PLA (Gembird 3DP-PLA1.75-01-GR). A 3D nyomtatást egy Creality Ender 5 típusú berendezésen végeztük, amelyen a nyomtatási minőséget befolyásoló módosítások nem történtek a gyári állapothoz képest. A nyomtatási beállítások a következők voltak: 205 °C fúvóka hőmérséklet, 60 °C asztal hőmérséklet, 25% belső kitöltés, 0,2 mm rétegvastagság, 0,3 mm vonalvastagság.

Előkísérletek során megvizsgáltunk többféle szabványos, illetve módosított geometriákat is. Ezen kialakítások az anyagvizsgáló berendezésben húzó igénybevétellel hoznak létre nyírást. Egyszeresen nyírt (ASTM D906 [6]) és kétszeresen nyírt (ASTM D3528 [7]) geometriák esetén is azt tapasztaltuk, hogy nem az elméleti nyírási síkban mentek tönkre a 3D nyomtatott próbatestek (1. ábra).

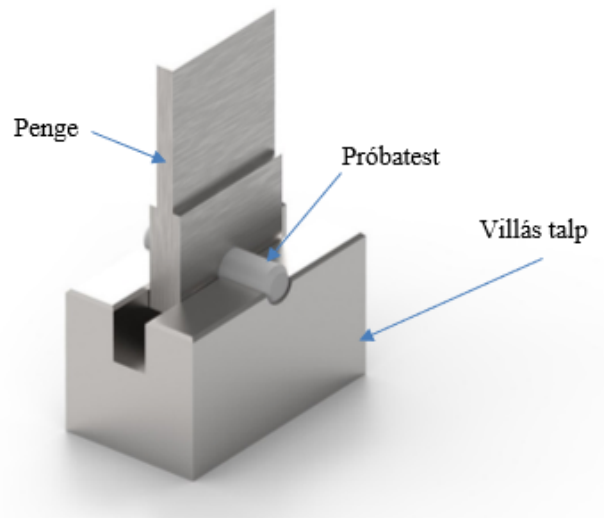
A kísérleteket Zwick Roell Z100 típusú univerzális anyagvizsgáló berendezésen végeztük, 3 mm/min elmozdulási sebességgel. A berendezésen található erőmérő cella mérési hibája 200-1 000 N mért érték között 1%, 1 000 N felett pedig 0,5%. A tönkremenetel oka, hogy az adhézió és az alapanyag szilárdsága hasonló nagyságrendű, ezért az alapanyag mechanikai tulajdonságai határozzák meg a tönkremenetel módját [8], összetett igénybevétel miatt. Ezek a mérési megoldások akkor tudják a nyírást jellegű tönkremenetellel biztosítani, ha az adhézió kisebb mértékű az anyag szilárdságához képest (pl.: átlapolt, ragasztott kötések esetén).

További előkísérletet végeztünk az ASTM B831 [9] szabvány alapján készült próbatesteken, amely elsősorban homogén lemezek nyíró vizsgálatára alkalmas. A kísérlet során azt tapasztaltuk, hogy a próbatestek nem a tervezett tönkremeneteli zónában nyíródtak el. A jellemző tönkremenetel a horony végéből kiinduló, a húzás irányára merőleges repedés volt (2. ábra). Ebben az esetben a tönkremenetel oka a polimerek fémekhez viszonyított alacsony rugalmassági modulusában keresendő. Műanyagok esetén jóval nagyobb deformáció keletkezik a szabványos próbatesten, ugyanilyen geometriájú fém próbatesthez képest, ezért a hajlítás dominánssá válik a kísérlet során. Így a próbatesten nem nyírást jellegű tönkremenetel tapasztalható.

Az előzetes mérésekből azt a következtetést vontuk le, hogy az általunk keresett tönkremeneteli módhoz – vagyis a rétegek közötti síkon történő nyírást általi tönkremenetelhez – valószínűleg nem lehetséges olyan geometriát kialakítani a választott alapanyagból, ami ebben a vizsgálati rendszerben



2. ábra: Az ASTM B831 alapú próbatest tönkremenetele



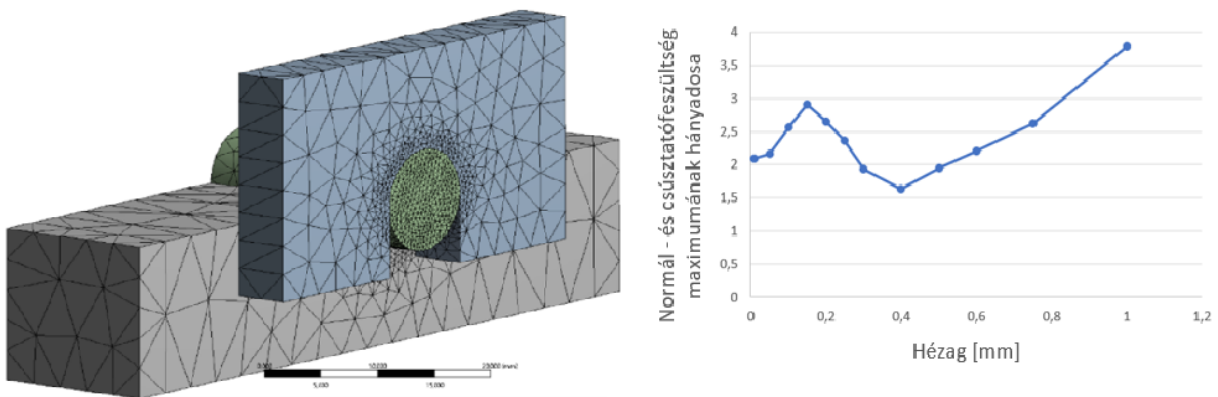
3. ábra: A nyírókészülék

biztosítaná a megfelelő feszültségi állapotot és tönkremenetelt. Az elvégzett kísérletek alapján elvettük a húzáson alapuló vizsgálati elrendezést. A továbbiakban bemutatjuk az új készülék tervezését, amellyel várhatóan elérhető lesz a kívánt tönkremeneteli mód megbízható mérése.

3. Optimális nyírási környezet kialakítása és tesztelése

A rendelkezésre álló anyagvizsgáló berendezés felszerelhető egyedi készülékekkel, mérőberendezésekkel is, de új készülék tervezésével párhuzamosan a hozzá tartozó próbatestet is szükséges megtervezni. A folyamathoz a MIL-STD-1312-13 [10] szabvány nyújtott segítséget, ami a kötőelemek nyíróvizsgálatával foglalkozik és villás nyírókészülék kialakítást mutat be (3. ábra). A készülék kialakításakor fontos tényezők voltak az erőmérő cella pontossága, a csatlakozó felek között elérhető legnagyobb távolság, a már meglévő egyedi készülékek rögzítési módjának újra-felhasználása, valamint a készülék legyártásához rendelkezésre álló technológiák.

A penge és a villás talp között javasolt hézagot a mi vizsgálati esetünkre optimalizáltuk végeelem analízist használva. A végelem analízishez az Ansys softvercsomag 2019 R1 verzióját használtuk, az Ansys Workbench Static Structural moduljában dolgoztunk. A végelem analízis során a szerkezet szimmetriáját kihasználva a szimmetria sík mentén kettévágott modellt alkalmaztunk, az



4. ábra: a) A végelem analízis során alkalmazott háló; b) A maximális normál - és csúsztató feszültség hányadosa a nyírási síkban a hézag függvényében

analízis szempontjából elhanyagolható további részek eltávolításával (4/a ábra). A vizsgált hézag 0-1 mm között 12 lépcsőben került kiértékelésre. 0 és 1 mm közötti hézagok hatását vizsgáltuk meg a próbatestben ébredő feszültségekre vonatkozóan. A legmegfelelőbb hézag az, amelynél a normál- és csúsztatófeszültségek aránya a legkisebb (4/b ábra), hiszen ez áll a legközelebb a tiszta nyíráshoz. Az analízis eredménye azt mutatja, hogy túlságosan kicsi rés esetén jelentős a felületi feszültség hatása, ezért 0,4 mm-es oldalankénti hézagot érdemes létrehozni a készülékben. A készülék alsó felét egy, már meglévő hajlítókészülék rögzítésére szolgáló sínbe helyezük, míg a felső felét a húzáshoz alkalmazott szorítókkal fogtuk meg (5. ábra).

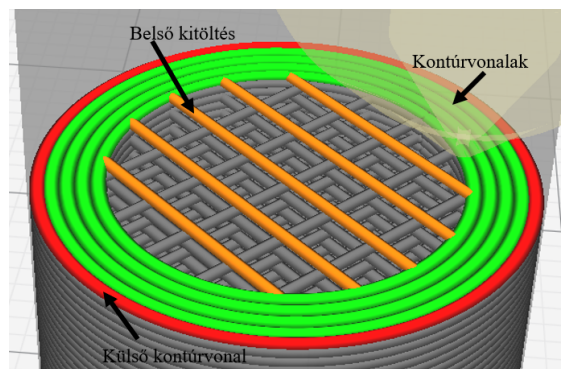
4. Laboratóriumi vizsgálatok

A rétegek nyomtatása során először az aktuális réteg (a 6. ábrán színessel kiemelt rész) kontúrvonalát készíti el a berendezés, a szelet külső határolóvonalait. Ha egynél több kontúrvonal van, általában kívülről a második vonal készül el először, majd ezután a külső kontúrvonal (a 6. ábrán piros színnel). A külső kontúrvonal után visszatér a fej a test belsejébe, folytatja a hátralévő kontúrvonalak létrehozását (a 6. ábrán zöld színnel). Miután a kontúrvonalak elkészültek, a berendezés a belső kitöltést készíti el (a 6. ábrán narancssárga színnel), minden rétegben csak párhuzamos vonalak készülnek, rétegenként felváltva 90° bezárt szöggel. 0 kontúrvonal esetén csak kitöltés típusú vonalak készülnek el. A vizsgálat során alkalmazott belső kitöltés egy rétegen belül csak egymással párhuzamos vonalakat tartalmaz, az előző rétegre merőlegesen elhelyezve azokat.

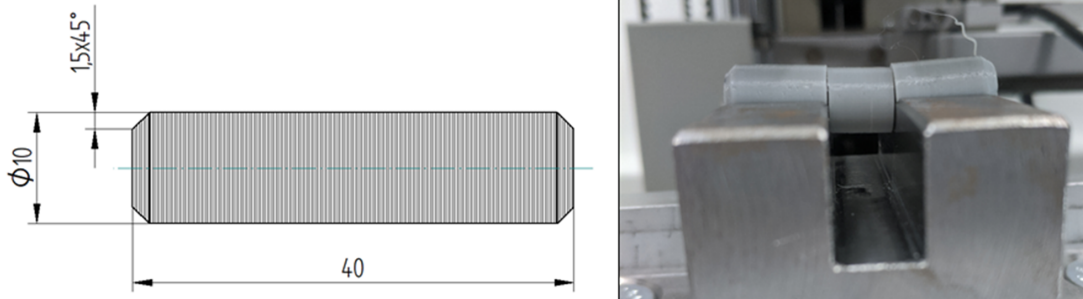
A készülék tesztelése során megállapítottuk, hogy a névleges méretre készített próbatestek (7/a ábra) a gyártástechnológia sajátosságai miatt megszorulnak a kialakított horonyban, ami negatívan hat a mérés pontosságára. A próbatestek nyomtatási paramétereit úgy változtattuk, hogy a próbatest mérete 9,9-10 mm közötti legyen. Továbbá megállapítottuk, hogy a kialakítás megfelelő, mert a rétegek közötti sík mentén közel tiszta nyírás történt (7/b ábra), vagyis a próbatestek az elvárásoknak megfelelően mentek tönkre. A vizsgálatok során a próbatestek terhelhetősége 500 N és 3 300 N között változott, míg az erőmérő cella hibája 5-16,5 N közötti, vagyis elhanyagolható. Ez alapján az mért erő megfelelően dokumentálható, amelyet a 8. ábrán látható ismételhetőség is bizonyít. Az új rendszerrel a kontúrvonalak számának nyírószilárdságra gyakorolt hatását vizsgáltuk a továbbiakban. A kontúrvonalak számát 1 és 9 között vizsgáltuk meg, 25% belső kitöltés mellett.



5. ábra: A nyírókészülékbe befogott próbatest nyírás előtt



6. ábra: A nyomtatott test keresztmetszete a szeletelő programban



7. ábra: a) A próbatest és a rétegek iránya; b) A próbatest tönkremenetele

5. Eredmények

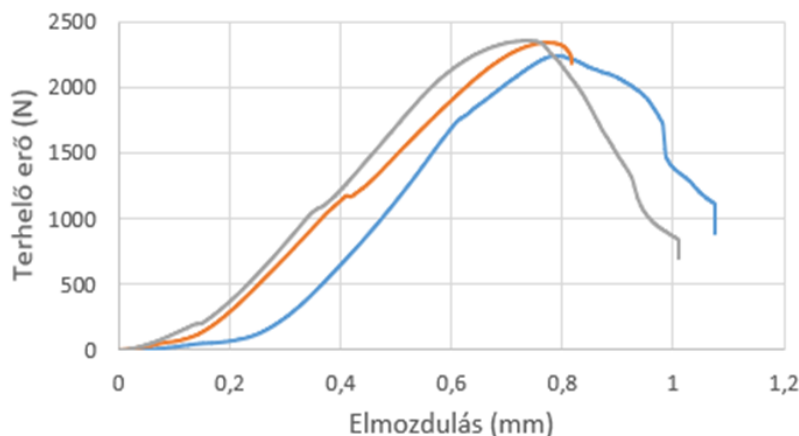
Az elvégzett mérések eredményeit a 9. ábra foglalja össze, ahol a kontúrvonalak számának függvényében látható a tönkremenetelhez szükséges erő. 0 kontúrvonallal rendelkező próbatestek mérése bizonytalan értékeket eredményezett. A grafikonon az azonos kontúrvonalsszámmal gyártott próbatesteken mért maximális erőhöz tartozó átlag szerepel, 95,4%-os valószínűséghez tartozó hibasávval. A vizsgált tartományban lineáris összefüggés van a kontúrvonalak száma és a teherbírás között, azonban mivel egyre csökken a kontúrvonalakkal hozzáadott felület, ezért szélesebb intervallumban vizsgálódva várhatóan telítődés jellegű függvénykapcsolatot figyelhetünk meg. A legnagyobb szórás $\pm 20\%$ ($\pm 2\sigma$), ami a próbatest gyártástechnológiájából adódik.

6. Értékelés

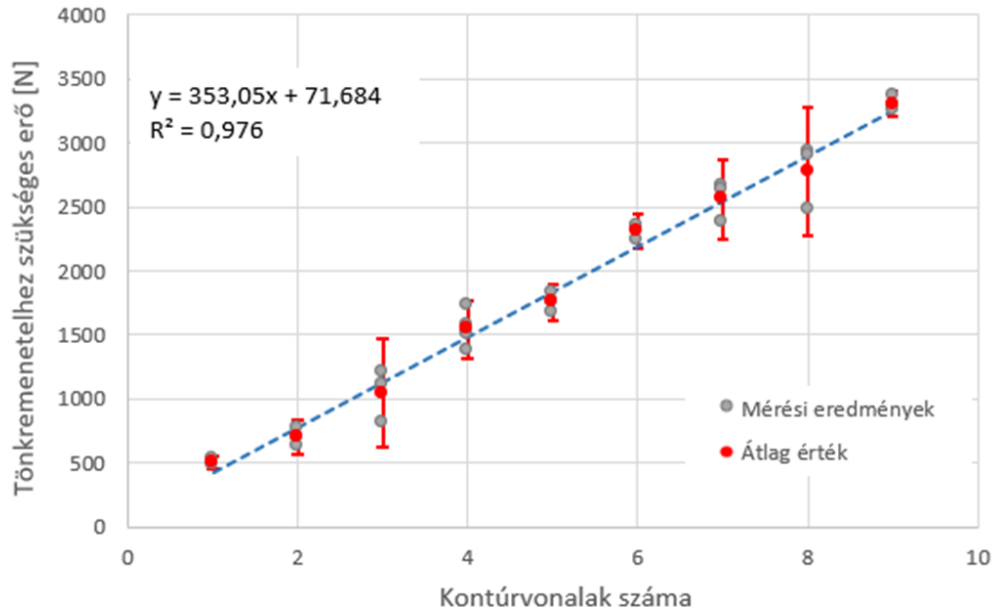
Elemeztük az aktív felület hatását a teljes próbatest teherbírására. A töret felületeit megvizsgálva megállapítottuk, hogy mivel az alkalmazott kitöltési mód egy rétegben csak $x+45^\circ$, míg a következő rétegben $x-45^\circ$ irányban generál kitöltést, ezáltal mindössze a vonalak kereszteződésénél van kapcsolat a kitöltés vonalainak az átfedése között (10. ábra). Az egymás felett elhelyezkedő vonalak között nem alakul ki adhézió, ezért az aktív felületet számító képletben egy módosító tényezőt alkalmaztunk, ahol $d = 1,2$ mm (a belső kitöltésben mérhető vonalak közötti távolság, 10. ábra). A számításhoz használt összefüggés további paraméterei: $r = 4,95$ mm (próbatest külső sugara), $v = 0,3$ mm (kontúrvonal vastagsága), n pedig a kontúrvonalak száma. Ezek felhasználásával az aktív felület:

$$A = A_{\text{kontúr}} + A_{\text{kitöltés}} = [r^2\pi - (r - vn)^2\pi] + \left[0,25\frac{v}{d}(r - vn)^2\pi\right]. \tag{1}$$

Az összefüggés első tagja a teljesen kitöltött külső gyűrű területe, míg a második a rácsvonalak területe 25%-os kitöltöttség esetén (eredmények a 11. ábrán).



8. ábra: A 6 kontúrvonallal gyártott próbatestek tönkremeneteli diagramja

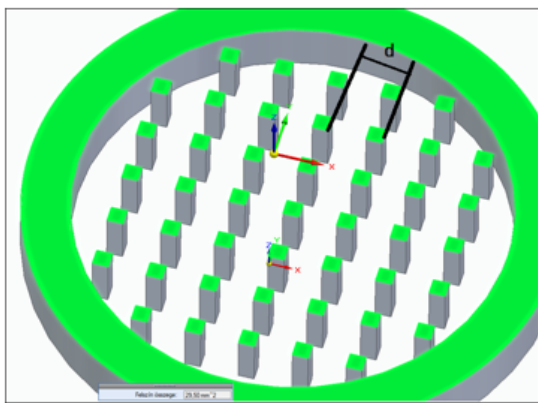


9. ábra: A kontúrvonalak számának hatása a nyírószilárdságra

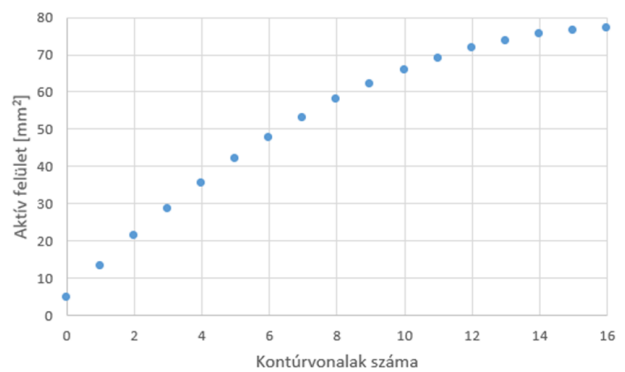
Az adhéziót az alábbi közelítő összefüggéssel számítottuk, amelyben F a tönkremenetelkor mért erő, A pedig az aktív felület:

$$\tau = \frac{F}{2A}. \tag{2}$$

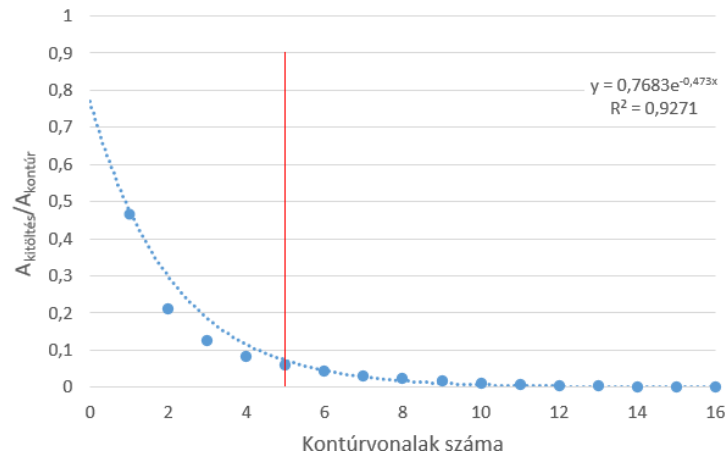
Az aktív felület figyelembevételével a korábbi kutatások és gyártói adatokkal jól egyező [7], 16-26 MPa átlagos értékű adhéziót kaptunk. Mindazonáltal az is belátható, hogy bár az aktív felület adott, alacsony kontúrvonalaszám esetén a belső kitöltés által hozzáadott aktív felület 5 kontúrnál még 5% felett van, így hatása a mérési eredményekben jobban megjelenik, amelyet a 12. ábrán látható $A_{\text{kitöltés}}/A_{\text{kontúr}}$ arány jól jellemez. Az 5 határ-kontúrvonalaszám alatt jelentős a belső kitöltés a kontúrvonalakkal hozzáadott felülethez képest, míg e felett annak hatása gyakorlatilag elhanyagolható, az adhézió értéke gyakorlatilag állandó, 24-25 MPa. A belső kitöltés fajlagos terhelhetősége alacsonyabb, mint a kontúrvonalaké, ezért emelkedik kis mértékben az adhézió 6 kontúrig (13. ábra). A pontos hatásmechanizmus megállapításához további mérések és szimulációk szükségesek.



10. ábra: Teherviselő aktív felületek helyzete



11. ábra: Az aktív felület a kontúrvonalak számának függvényében

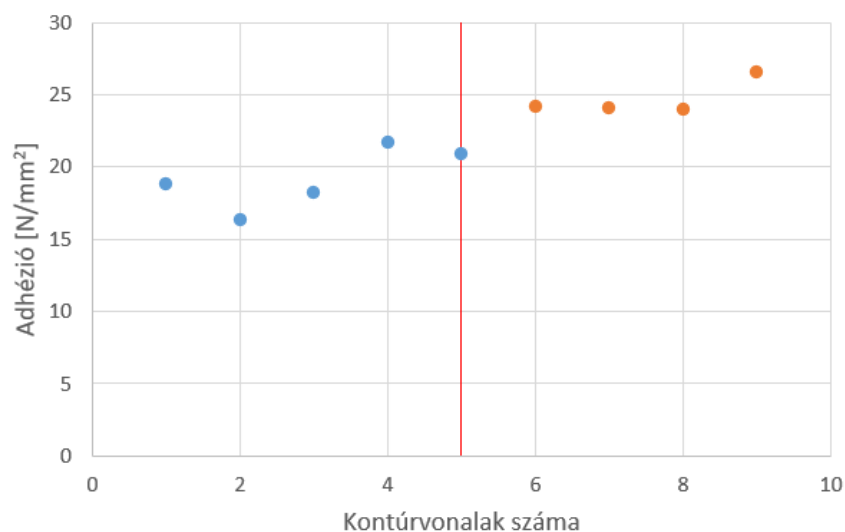


12. ábra: Az aktív felületben résztvevő felületek aránya a kontúrvonalak szám függvényében

7. Összefoglalás

A kutatás során olyan vizsgálati módot kerestünk, amellyel gyors-prototípusgyártási technológiával (FDM) készített próbatestek nyírása megbízhatóan és pontosan vizsgálható. A vonatkozó szakirodalom áttekintése alapján megállapítottuk, hogy egyszerű próbatest segítségével, távolodó befogásban végzett vizsgálatot több szabvány meghatároz, valamint egyedi készülékkel történő, közeledő pofákkal elvégzett nyíráshoz is található szabványos ajánlás.

Az előkísérletek során több átlapolt, ragasztott kötésre kialakított adhéziós kapcsolat teherbírását vizsgáló próbatest geometriát gyártottunk le és vizsgáltunk meg. Az eredmények azt mutatták, hogy az átlapolt kötés nyíróvizsgálata csak olyan esetben alkalmazható, ahol a kötés szilárdsága jelentősen elmarad az adhézió által kötött anyagok szakítószilárdságától. További probléma, hogy polimerek esetén a kisebb rugalmassági modulusz miatt a deformáció nagyobb, így a hajlítási komponens jelentőssé válik aszimmetrikus próbatestek esetén. Megvizsgáltunk homogén fémek nyírására alkalmas próbatest geometriát is, de a tönkremenetel ebben az esetben sem volt megfelelő, mivel a polimerek alacsony rugalmassági modulusa jelentősen befolyásolta a fellépő hajlítást. A tapasztalatok alapján megállapítottuk, hogy ez az elrendezés nem megfelelő a célunkhoz, ezért kifejezetten a nyíró igénybevétel létrehozására alkalmas készülék tervezése mellett döntöttünk.



13. ábra: Kompensált aktív felületre módosított adhézió a kontúrvonalak számának függvényében

A tervezéshez felhasználtuk a MIL-STD-1213-13 szabványt [9], illetve adaptáltuk a rendelkezésre álló gyártástechnológiára, felhasználási környezetre. A legfontosabb lépés a penge és a villás talp közötti hézag méretének megállapítása volt, melyhez végeelem analízist alkalmaztunk. Megállapítottuk, hogy a kialakított rendszer a kívánt tönkremenetelt eredményezi. Célunknak megfelelően, több tucat próbatesten a nyírási sík tisztán kivehető volt, valamint mind egy-egy sík mentén váltak több részre.

Az új rendszerben vizsgáltuk a kontúrvonalak hatását a nyírószilárdságra, 1-9 közötti kontúrvo-nallal rendelkező próbatestek esetén. A megfelelő aktív felület számítási módszer kidolgozása után megállapítottuk, hogy a 3D nyomtatott alkatrész rétegei közötti adhézió a PLA anyagnál nagy-ságrendileg 14-24 MPa közé adódik. Fontos megjegyezni, hogy alacsony kontúrvonalszám esetén a próbatestek kisebb szilárdságot mutattak. Elegendően nagy kontúrszám felett az adhézió viszont lényegesen nem változik – telítődést mutat 23 MPa érték körül.

8. Köszönetnyilvánítás

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Program-jának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

9. Irodalomjegyzék

- [1] F.B. Prinz, C.L. Atwood, R.F. Aubin, *JTEC/WTEC panel report on rapid prototyping in Europe and Japan. Volume 1: Analytical chapters*, United States: N. p., 1997. Web, [url](#)
- [2] T. Rayna, L. Striukova, *From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation*, Technological Forecasting and Social Change 102, 2016, pp. 214-224, [CrossRef](#)
- [3] ASTM F2792-12a, *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, [CrossRef](#)
- [4] J.C. Halpin, J.L. Kardos, *The Halpin-Tsai equations: A review*, Polymer Engineering and Science 16(5), 1976, pp. 344-352, [CrossRef](#)
- [5] M.D. Nestorović, N.T. Iliadis, *Onset of failure in finitely strained layered composites subjected to combined normal and shear loading*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 52(4), 2004, pp. 941-974, [CrossRef](#)
- [6] ASTM D906-20, *Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Plywood Type Construction in Shear by Tension Loading*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, [CrossRef](#)
- [7] ASTM D3528-96, *Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, [CrossRef](#)
- [8] M. Andó, M. Biroosz, Sudhanraj Jeganmohan, *Surface bonding of additive manufactured parts from multi-colored PLA materials*, Measurement 169, 2021, 108583, [CrossRef](#)
- [9] ASTM B831-19, *Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, [CrossRef](#)
- [10] MIL-STD-1312-13, *Fastener test methods: Method 13 – Double Shear Test*, Department of Defense – United States of America, Washington DC, 1984.

OPTIMÁLIS NEURÁLIS HÁLÓZAT KIVÁLASZTÁSA BAYES-BECSLÉS SEGÍTSÉGÉVEL

Kondics Milán^a, Szekeres Béla János^{b*}

^a ELTE Informatikai, Kar, Programtervező informatikus MSc, 1. évf.

^b ELTE Informatikai, Kar, Numerikus Analízis Tanszék, egyetemi adjunktus

ABSZTRAKT

Ezen munkánkban célunk, hogy neurális hálózatokra alkalmazva a Bayes-beclést az *a posteriori* beclések során a különböző modellek közül kiválasszuk a tanító adatoknak legjobban megfelelőt. Mindehhez egy sokdimenziós integrál kiszámítása szükséges, amely a hagyományos Monte-Carlo módszerekkel is nehéz feladat; erre a célra a beágyazott mintavételezés (nested sampling) algoritmust alkalmazzuk, és a számítások járulékos eredményeként kapjuk meg a betanított hálózatot a hiperparaméterek terében is bolyongást végezve. Továbbá rámutatunk arra, hogyan lehet ötvözni a gradiens visszaterjesztés és a véletlen bolyongásos tanítást hibrid hálózatokat nyerve.

Kulcsszavak: *neurális hálózat, nested-sampling, Bayes-tétel*

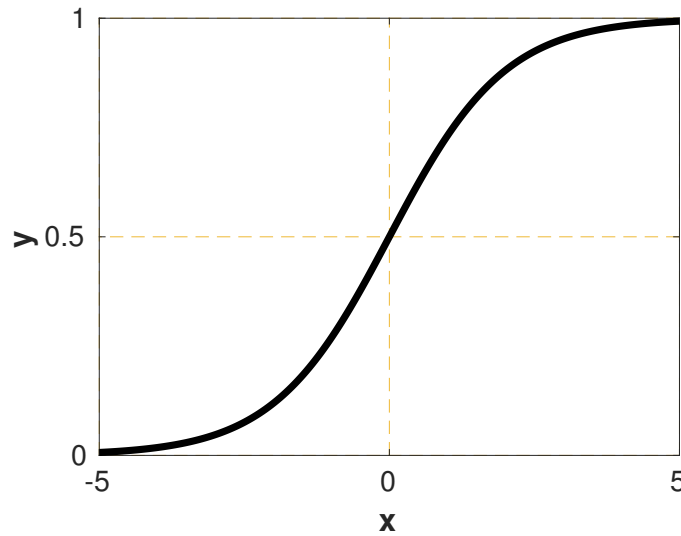
1. Bevezetés

A gépi tanulás és a mesterséges intelligencia a számítástudomány sokak által kutatott területe modern világunkban [1]. A tudományos fantasztikus irodalom mellett számtalan valódi alkalmazása létezik, alkalmazzák például beszéd-, arcfelismerésre, vagy önvezető járműveknél [2]. A múlt század vége felé merült fel a gondolat biológiai alapokon működő számoló rendszerek létrehozására azzal a céllal, hogy megfigyelt mintákból vonjunk le tanulságot. De mit jelent tanulni? A neuronjaink tanulnak jelen ismereteink szerint; csoportokba szerveződnek, elektromos ingerek vezérik a rendszerüket, úgy hogy a megfigyelt mintákra valamilyen értelemben optimálisan reagáljanak.

Ennek modellezéséhez az első fejezetben a szükséges matematikai eszközöket tekintjük át. A második fejezetben ismertetjük az alkalmazott algoritmust, melynek előnye, hogy neurális hálózatokra alkalmazva a Bayes-beclést [3] az *a posteriori* (utólagos) beclések során a különböző modellek közül kiválaszthatjuk a tanító adatoknak leginkább megfelelőt. Mindehhez egy sokdimenziós integrál kiszámítása szükséges, ez hagyományos Monte-Carlo módszerekkel nem megoldható, ezért beágyazott mintavételezést [4] alkalmazzuk. A módszer bár nem új, az újszerűségét alkalmazásának módja adja, pontosabban, hogy az optimalitást jellemző mérőszám meghatározására fókuszálunk, illetve a hálózat kimeneti rétegét nem véletlen bolyongás segítségével, hanem Tikhonov-regresszióval [5] tanítjuk. Célunk, hogy a szakirodalomban fellelhető módszerek többségével ellentétben a hiperparaméterek terében is bolyongva hasonlítsunk össze különböző hibrid neurális hálózatokat e mérőszám segítségével. Egy tesztfeladaton megmutatjuk, hogyan vizsgálható egyszerűen a segítségével a túlillesztés problémája. Numerikus szimulációkkal támasztjuk alá eredményeinket.

2. Felhasznált matematikai ismeretek

A neurális hálózatot irányított gráfként képzeljük el [2]. Tegyük fel, hogy balról jobbra haladnak az élek a csúcsok között, továbbá oszlopokba rendezzük a csúcsokat, ezeket az oszlopokat rétegeknek nevezzük. Az egyes rétegek között nem feltétlen fut az összes csúcs között él. A balszélső csúcsokat



1. ábra: A szigmoid függvény grafikonja

nevezzük bemeneti csúcsoknak, a jobbszélsőket pedig kimenetieknek. A gráf csúcsait neuronoknak nevezzük. Az élek súlyokkal rendelkeznek. A gráf összefüggő, nincs benne kör – a hálózatot ekkor előrecsatoltnak nevezzük – többszörös él, továbbá mindegyik kimeneti neuron elérhető valamely bemenetiből.

2.1. Többrétegű előrecsatolt hálózatok

Legyenek adottak $\alpha, \beta > 0$ valós számok. A hálózatban legyen N darab kimenő neuron, L darab bemenő, továbbá M darab (\mathbf{x}, \mathbf{t}) tanítóminta-párunk, ahol $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^L$ bemeneti,- illetve $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^N$ célvektorok. A hálózatunknak legyen W darab éle. Az éleken az összes súlyok vektorát jelöljük $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^W$ -vel. Legyen adott továbbá az $f_j : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ a j indexű nem bemeneti neuron aktivációs függvénye például $f_j(a) = \frac{1}{1+\exp(-a)}$, $f_j(a) = \tanh(a)$ vagy $f_j(a) = a$.

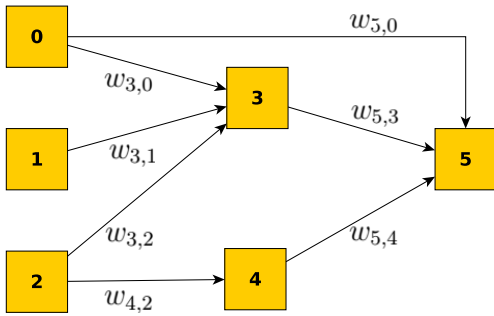
Az 1. ábrán láthatjuk az $f_j(x) = \frac{1}{1+\exp(-x)}$ szigmoid függvény grafikonját, amely az egyik leggyakrabban alkalmazott aktivációs függvény. A hálózat az agy működéséhez hasonlóan felfogható úgy, mint elektromos ingerek terjedése. A hálózat gráfjának élein értelmezett súlyok úgy képzelhetők el, mint az adott élnek megfelelő szinapszis erőssége. Minél nagyobb a súly, annál jobban terjed rajta az inger, valamint minél nagyobb inger ér egy neuront, annál biztosabb az aktivációja, azaz lesz az értéke példánkban 1-hez közeli. Ha túl kicsi inger ér egy neuront, akkor az aktivációs függvény 0-ra állítja a neuron értékét, nem engedve a rajta áthaladó inger továbbterjedését.

A hálózat működése:

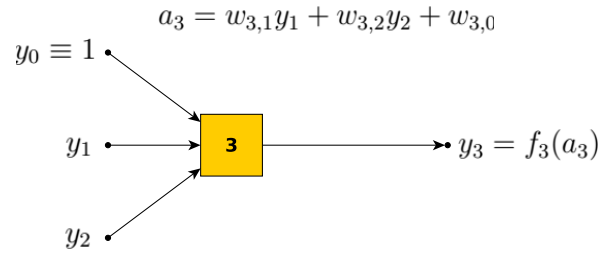
Ha a j indexű nem bemeneti neuronra az l indexű szülőjétől y_l nagyságú inger érkezik, és az őket összekötő szinapszis erőssége $w_{j,l}$, továbbá a neuron aktiválásához $w_{j,0}$ nagyságú küszöbinger szükséges, akkor az összes a neuronra ható inger összegezhető, mint

$$a_j = \sum_{l \in \{j \text{ őseinek halmaza}\}} w_{j,l} y_l + w_{j,0}.$$

Az őt elhagyó hatás pedig $y_j = f_j(a_j)$ nagyságú. Amennyiben az l index bemeneti csúcsot jelöl, akkor y_l a neki megfelelő komponense az aktuális tanítómintapár \mathbf{x} bemeneti vektorának. A küszöbinger felfogható úgy, mint egy, a hálózathoz adott extra 0 indexű bemeneti csúcs, amelyet az összes (nem bemeneti) neuronnal összekötünk. Ebből a j . csúcsba menő él súlya pedig $w_{j,0}$, továbbá adott $y_0 = 1$ bemeneti értékkel. 2. és 3. ábrán látható egy ilyen hálózat felépítése.



2. ábra: Neurális hálózat két bemeneti neuronnal (1 és 2 indexű) és egy kimenetivel (5 indexű)



3. ábra: A 3 indexű neuron y_3 kimenetének számítása. A 0 indexű csúcs felel meg az eltolási paraméternek, értéke $y_0 \equiv 1$

Az egyes jelölések magyarázata következik, amelyeket használni fogunk még:

- m : az m -edik mintát vizsgáljuk épp.
- $y_i^{(m)}$: az i -edik neuron kimenete az m -edik tanítómintapár bemenetét végigáramoltatva a hálózaton, egyben a j -edik neuron bemenete, ha i -ből vezet él j -be.
- $w_{j,i}$: az i -edik neuronból a j -edik neuronba mutató élen lévő súly. Minden csúcs bemenetéhez hozzáadunk mesterségesen egy $y_0^{(m)} = 1$ értéket, a j . csúcs esetén $w_{j,0}$ súllyal.
- $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^W$ a $w_{j,i}$ súlyokból álló vektor.
- Az m -edik mintapár négyzetes hibája:

$$\mathcal{E}(m) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (t_j^{(m)} - y_j^{(m)})^2,$$

ahol $t_j^{(m)}$ jelöli az m -edik tanítómintapárban az elvárt kimenet j -edik komponensét, az ennek megfelelő tényleges kimenet pedig $y_j^{(m)}$. Az átlagos négyzetes hiba pedig az összes mintapáron ezek átlaga, azaz

$$\bar{\mathcal{E}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathcal{E}(m). \tag{1}$$

Az átlagos négyzetes középhiba pedig ennek négyzetgyöke. A hálózat tanításának célja, hogy az (1) formulában szereplő hibafüggvényt minimalizáljuk. Erre a célra a Metropolis-algoritmust [6] fogjuk közvetve alkalmazni a gyakorlatban elterjedt gradiens visszaterjesztés helyett. Ennek okát a beágyazott mintavételezési algoritmust tárgyaló részben láthatjuk, mely szerint úgy szeretnénk a hálózat \mathbf{w} súlyait véletlenszerűen változtatni, hogy közben csökkentsük a hibát és a súlyok az *a priori* (jósló) eloszlásból származzanak. A Metropolis-algoritmust a következő részben ismertetjük.

2.2. A Metropolis–Hastings algoritmus

Egy példán keresztül vizsgáljuk az algoritmust, amelyet a [6] munkában ismertettek először. A feladat az, hogy generáljunk véletlen mintákat egy képlettel adott eloszlásból, azaz $x \sim \pi(x)$. Legyen például $\pi(x)$ a következő eloszlás:

$$\pi(x) = \frac{\exp(-x^2) (2 + \sin(5x) + \sin(2x))}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2) (2 + \sin(5x) + \sin(2x)) dx}. \tag{2}$$

A probléma az, hogy már a nevezőben szereplő integrált se könnyű kiszámítani. A Metropolis–Hastings algoritmus lényege, hogy készítünk egy Markov-láncot (jelöljük a tagjait úgy, hogy

x_0, x_1, x_2, \dots), amelynek a stacionárius eloszlása éppen a kívánt π eloszlás. Azaz ha $n \rightarrow \infty$, akkor $x_n \sim \pi(x)$ teljesülni fog. Tegyük fel, hogy a Markov-lánc aktuális eleme x_n ; mi x_{n+1} -et szeretnénk előállítani. Szükségünk van tehát egy x^* jelöltre, ehhez pedig egy $Q(x^*|x_n)$ jelölt eloszlásra, ami feltételesen függ az aktuális x_n állapottól. Egy lehetséges klasszikus választás a jelölt eloszlásra egy x_n -re centrált normális eloszlás, azaz

$$x^*|x_n \sim \mathcal{N}(x_n, \sigma^2),$$

a σ értéket „ügyesen” kell megválasztani. Tehát vegyünk egy x^* mintát ebből a jelölt eloszlásból, ezt valamilyen α valószínűséggel elfogadjuk, mégpedig:

$$\alpha = \min \left(1, \frac{\pi(x^*) Q(x_n|x^*)}{\pi(x_n) Q(x^*|x_n)} \right).$$

Ez azt fogja eredményezni, hogy a (2) formulában szereplő normalizáló konstanssal nem is kell foglalkozni, mert a π eloszlás nevezőjében lévő integrál az előbbi törtben kiegyeszesül. A Q eloszlást kell még jól megválasztani, ha Q szimmetrikus, mint a normális eloszlás esetén, akkor $\frac{Q(x_n|x^*)}{Q(x^*|x_n)} = 1$. Szimmetrikus Q esetén a módszert Metropolis-algoritmusnak nevezzük.

Ezután generálunk egy 0 és 1 közötti u véletlen számot egyenletes eloszlásból. Amennyiben $u \leq \alpha$, akkor x^* -ot elfogadjuk x_{n+1} -ként, egyébként pedig $x_{n+1} := x_n$. A Metropolis-algoritmus pseudokódját az 1. algoritmus mutatja be.

2.3. Bayesi neurális hálózatok

Ebben a részben a Bayesi neurális hálózatok elméletét ismertetjük a [3] munka alapján. Tekintsünk a továbbiakban előrecsatolt hálózatokat. A cél, hogy a $D = \{\mathbf{x}^{(m)}, \mathbf{t}^{(m)} : \mathbf{x}^{(m)} \in \mathbb{R}^L, \mathbf{t}^{(m)} \in \mathbb{R}^N \text{ és } 1 \leq m \leq M\}$ rendelkezésre álló adatokon a hálózaton $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_W)$ optimalásával – W a gráf éleinek száma – minimalizáljuk az összes hibát, azaz az alábbi függvényt.

$$E_{\beta, D}(\mathbf{w}) = \frac{\beta}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (t_n^{(m)} - y_n(\mathbf{x}^{(m)}, \mathbf{w}))^2, \quad (3)$$

ahol $t_n^{(m)}$ jelöli a $\mathbf{t}^{(m)}$ m -edik célvektor n -edik komponensét.

1. Algoritmus: A Metropolis-algoritmus x kezdőmintából indítva, F lépésszámmal

$x_1 := x$;

for $n=1:F$ **do**

 generáljunk mintát a jelölt eloszlásból, azaz $x^*|x_n \sim Q(x^*|x_n)$;

$\alpha = \min \left(1, \frac{\pi(x^*)}{\pi(x_n)} \right)$;

 generáljunk egy u véletlen számot 0 és 1 között egyenletes eloszlásból;

end

if $u \leq \alpha$ **then**

$x_{n+1} := x^*$

else

$x_{n+1} := x_n$

end

return x_{F+1}

Hozzáadunk $E_{\beta,D}(\mathbf{w})$ -hez még egy $E_{\alpha}(\mathbf{w})$ regularizáló tagot is, amely

$$E_{\alpha}(\mathbf{w}) = \frac{\alpha}{2} \sum_{j=1}^W w_j^2. \tag{4}$$

Az α/β hányados nagysága azt mutatja meg, hogy mennyire büntetjük a nagy súlyokat a hiba minimalizálásához képest. Az ötlet az, hogy \mathbf{w} -re tekintsünk most úgy, mintha valamilyen ismert *a priori* speciális eloszlásból származó valószínűségi változó volna, majd a Bayes-beclést használva előállíthatjuk az *a posteriori* eloszlását \mathbf{w} -nek. Ami azt jelenti, hogy a tanító adatoknak jobban megfelelő \mathbf{w} -t kapunk.

Legyen tehát a súlyok *a priori* eloszlása $1/\alpha$ szórásnégyzetű normális eloszlás, azaz a súlyok együttes sűrűségfüggvénye úgy írható, mint

$$p(\mathbf{w}|\alpha) = \prod_{i=1}^W p(w_i|\alpha) = \frac{\exp(-E_{\alpha}(\mathbf{w}))}{(2\pi)^{W/2} \alpha^{-W/2}}. \tag{5}$$

A gráfot leíró modellt jelölje röviden \mathcal{G} , tegyük fel továbbá, hogy a tanítás során a D adatok normális eloszlásúak $y_n^{(m)}(\mathbf{x}^{(m)}, \mathbf{w})$ ($n = 1, \dots, N$ és $m = 1, \dots, M$) várható értékkel és $1/\beta$ szórásnégyzettel, azaz írhatjuk hogy

$$p(D|\mathbf{w}, \beta, \mathcal{G}) = \prod_{m=1}^M \prod_{n=1}^N p(t_n^{(m)}|\mathbf{x}^{(m)}, \mathbf{w}, \beta) = \frac{1}{(2\pi)^{MN/2} \beta^{-MN/2}} \exp(-E_{\beta,D}(\mathbf{t}, \mathbf{w})). \tag{6}$$

A hálózat klasszikus tanítása során azt a \mathbf{w}^* súlyt keressük, melyre $p(D|\mathbf{w}^*, \beta, \mathcal{G})p(\mathbf{w}|\alpha, \mathcal{G})$ vagy $p(D|\mathbf{w}^*, \beta, \mathcal{G})$ maximális volt, azaz amely mellett a legnagyobb valószínűséggel figyelhetjük meg a D adatokat. A Bayes-tételt felhasználva viszont azt a \mathbf{w} súlyt fogjuk megkeresni, amely a legvalószínűbb a D adatok ismeretében.

Megjegyzés: Folytassuk az alábbi sorozatot:

$$3, 7, 11, a_4 = ?.$$

A legtöbben rávágják, hogy 15 a következő elem. De ide bármilyen $a_4 = a$ számot írhatnánk igazából, hogyha a sorozat következő tagját egy interpoláló polinommal állítjuk elő (pontosabban fogalmazva, létezik olyan f harmadfokú polinom, amelyre $f(1) = 3, f(2) = 7, f(3) = 11$ és $f(4) = a$). Mégis, az első választ érezzük a helyénvalónak. Belátható a Bayes-tétel és valószínűségszámítási megfontolások segítségével, hogy valóban a 15 a legvalószínűbb válasz. Ez Occam borotvájának elve. Ha több lehetséges magyarázat is létezik egy jó válaszra, akkor a valószínűbbet fogadjuk el. Hogy melyik a legvalószínűbb, azt a Bayes-tétel segítségével határozhatjuk meg.

A Bayes-tétel:

Jelölje $p(\theta)$ a θ keresett paraméter *a priori* eloszlását, mielőtt még látnánk a megfigyelési adatokat. Továbbá, $p(D|\theta)$ annak a valószínűsége, hogy a D adatokat figyeljük meg ismerve θ -t. A Bayes-tétel felhasználásával a következőképpen határozhatjuk meg θ *a posteriori* eloszlását az adatok ismeretében:

$$p(\theta|D) = \frac{p(D|\theta)p(\theta)}{p(D)}.$$

Neurális hálózatokra alkalmazva a súlyok *a posteriori* eloszlása így

$$p(\mathbf{w}|D, \alpha, \beta, \mathcal{G}) = \frac{p(D|\mathbf{w}, \beta, \mathcal{G})p(\mathbf{w}|\alpha, \mathcal{G})}{p(D|\alpha, \beta, \mathcal{G})} = \frac{p(D|\mathbf{w}, \beta, \mathcal{G})p(\mathbf{w}|\alpha, \mathcal{G})}{\int_{\mathbb{R}^W} p(D|\mathbf{w}, \beta, \mathcal{G})p(\mathbf{w}|\alpha, \mathcal{G}) d\mathbf{w}}. \tag{7}$$

Azt a \mathbf{w}^* -t keressük, amelyre ez maximális, azaz az adott feltételek és megfigyelési adatok mellett a legvalószínűbb. Ez rögzített α, β hiperparaméterek és \mathcal{G} gráfszerkezet mellett akkor maximális, ha a tört számlálója, $p(D|\mathbf{w}^*, \beta, \mathcal{G})P(\mathbf{w}^*|\alpha, \mathcal{G})$ maximális, a nevező ugyanis független \mathbf{w} -tól. Ez azt jelenti, hogy a hálózat tanítása során éppen a hibát minimalizáló optimális \mathbf{w}^* súly a legvalószínűbb.

A hiperparamétereiről:

Felmerül a kérdés, hogy az α, β hiperparamétereket hogyan válasszuk meg, hiszen a (7) formulában ezeket *a priori* ismertnek tételeztük fel. Két lehetőségünk van:

- (a) Felváltva megkeressük az optimális \mathbf{w} súlyokat - akár visszaterjesztéses módszerrel, akár véletlen kereséssel - rögzített α, β értékek mellett és fordítva, azaz az imént talált \mathbf{w} súlyokat rögzítve megkeressük a legjobb α, β paramétereket. Ezt iterálva eljuthatunk egy optimális $\mathbf{w}_{\text{opt}}, \alpha_{\text{opt}}, \beta_{\text{opt}}$ hármashoz.
- (b) Alkalmazhatjuk a Bayes-tételt α és β mentén marginalizálva, azaz

$$p(\mathbf{w}|D, \mathcal{G}) = \frac{1}{p(D|\mathcal{G})} \int_0^\infty \int_0^\infty p(D|\mathbf{w}, \beta, \mathcal{G})p(\mathbf{w}|\alpha, \mathcal{G})p(\alpha)p(\beta) d\alpha d\beta, \quad (8)$$

ahol

$$p(D|\mathcal{G}) = \int_{\mathbb{R}^W} \int_0^\infty \int_0^\infty p(D|\mathbf{w}, \beta, \mathcal{G})p(\mathbf{w}|\alpha, \mathcal{G})p(\alpha)p(\beta) d\alpha d\beta d\mathbf{w}. \quad (9)$$

A gráf szerkezetének megválasztása:

Tegyük fel, hogy rendelkezésünkre állnak a \mathcal{G}_1 és \mathcal{G}_2 gráf szerkezetekhez tartozó (9) egyenlőségbeli $p(D|\mathcal{G}_1)$ és $p(D|\mathcal{G}_2)$ mennyiségek, vagyis hogy mekkora valószínűséggel figyeljük meg a D adatokat az *a priori* feltételezett két különböző gráf mellett. Nekünk arra volna szükségünk, hogy látva a D adatokat, meghatározzuk az adatoknak legjobban megfelelő gráfot.

Alkalmazva a (9) formulát és a Bayes-tételt összehasonlíthatjuk a két gráf valószínűségét az adatok megismerése után. Amennyiben ugyanolyan valószínűséggel választunk két különböző gráfszerkezetet, meghatározhatjuk az alábbi hányadost.

$$\begin{aligned} \frac{p(\mathcal{G}_1|D)}{p(\mathcal{G}_2|D)} &= \frac{p(\mathcal{G}_1) p(D|\mathcal{G}_1)/p(D)}{p(\mathcal{G}_2) p(D|\mathcal{G}_2)/p(D)} = \\ &= \frac{\int_{\mathbb{R}^W} \int_0^\infty \int_0^\infty p(D|\mathbf{w}, \beta, \mathcal{G}_1)p(\mathbf{w}|\alpha, \mathcal{G}_1)p(\alpha)p(\beta) d\alpha d\beta d\mathbf{w}}{\int_{\mathbb{R}^W} \int_0^\infty \int_0^\infty p(D|\mathbf{w}, \beta, \mathcal{G}_2)p(\mathbf{w}|\alpha, \mathcal{G}_2)p(\alpha)p(\beta) d\alpha d\beta d\mathbf{w}}, \end{aligned} \quad (10)$$

amely ha nagyobb egynél, akkor a \mathcal{G}_1 gráf írja le jobban az adatokat. Ezen (9)-beli integrálok még Monte-Carlo integrálással is nehezen számolhatóak, ezért beágyazott mintavételezést alkalmazunk a numerikus approximációhoz és mintegy járulékos eredményként kapjuk meg az optimális \mathbf{w} súlyokat és α, β hiperparamétereket.

2.4. A beágyazott mintavételezés

A feladat a (9) integrál kiszámítása, erre a célra a beágyazott mintavételezést fogjuk alkalmazni, melyet az [4] munka alapján ismertetünk. A feladat egy többdimenziós $\int_{\mathbb{R}^k} L(\theta)\pi(\theta) d\theta$ alakú integrál kiszámítása, L -t a továbbiakban likelihood függvénynek nevezzük, π pedig valamilyen k dimenziós eloszlás. Legyen N adott, ekkor az eljárás pszeudokódját a 2. algoritmus szemlélteti.

2. Algoritmus: A beágyazott mintavételezés algoritmus a tol toleranciaküszöbvel

```

Húzzunk  $N$  darab mintát a  $\pi$  a priori eloszlásból és kiszámítjuk  $L$  értékeit, azaz adottak
 $L(\theta_1), \dots, L(\theta_N)$  kezdeti likelihoodok.
 $Z = 0; X_0 = 1; j = 0;$ 
while  $\max\{L_1, \dots, L_N\} X_j < tol \cdot Z_j$  do
     $j = j + 1; X_j = \exp(-j/N); w_j = X_{j-1} - X_j;$ 
    Keressük meg a legkisebb likelihood értéket, ez tegyük fel, hogy  $\theta_i$  esetén vétetik fel;
     $Z = Z + L(\theta_i)w_j;$ 
    Keressünk az a priori eloszlásból olyan  $\theta$  értéket, amely független az  $N$  darab  $\theta_j$ -től és
     $L(\theta) > L(\theta_i)$  teljesül rá. Cseréljük ki  $L(\theta_i)$ -t erre az  $L(\theta)$ -ra, illetve  $\theta_i$ -t a talált  $\theta$ -ra.
end
 $Z = Z + X_j (L(\theta_1) + \dots + L(\theta_N)) N^{-1};$ 
return  $Z$ 
    
```

2.5. Lineáris regresszió a kimeneti rétegen

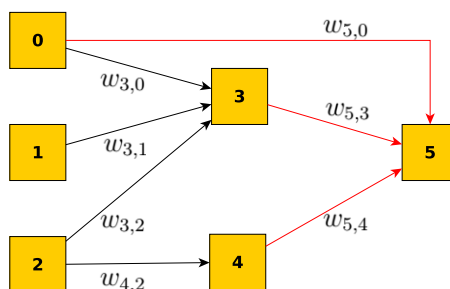
Ha olyan egyenletrendszer szeretnénk megoldani, amely több egyenletről áll, mint ismeretlent tartalmaz, azaz az $A\mathbf{x} = \mathbf{b}$ lineáris egyenletrendszer $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$ mátrixára $n > m$ teljesül, akkor lehetőségünk van az általánosított inverz segítségével az euklideszi normában legjobban approximáló megoldást előállítanunk az $\tilde{\mathbf{x}} = (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{b}$ alakban. Az $\tilde{\mathbf{x}}$ minimalizálja a $h(\mathbf{x}) = \|A\mathbf{x} - \mathbf{f}\|_0^2$ függvényt, ahol $\|\cdot\|_0$ -val az euklideszi normát jelöljük. Előfordulhat, hogy a $g(\mathbf{x}) = \|A\mathbf{x} - \mathbf{f}\|_0^2 + \gamma \|\mathbf{x}\|_0^2$ függvényt szeretnénk minimalizálni, ahol $\gamma \geq 0$. Ezt Tikhonov-regularizáció segítségével tehetjük meg, a minimumhelyet az $\tilde{\mathbf{x}} = (A^T A + \gamma I)^{-1} A^T \mathbf{b}$ formulával nyerhetjük [5], ahol $I \in \mathbb{R}^{n \times n}$.

A 4. ábrán látható példában a kimeneti csúcs az 5 indexű, a piros színűek a kimeneti élek, melyek súlyai $w_{5,0}$, $w_{5,3}$ és $w_{5,4}$. Olyan hálózatokat vizsgáltunk, ahol a kimeneti csúcsok aktivációs függvénye az identitás, így a kimeneti élek súlyait Tikhonov-regularizáció segítségével határozzuk meg, mely során az \tilde{x} -et megadó formulába $\gamma = \frac{\alpha}{\beta}$ kerül. Gradiens visszaterjesztést is alkalmazhatunk ezeken az éleken, így építhetünk egy egész előrecsatolt hálót is, a háló többi élét pedig továbbra is véletlen bolyongás segítségével tanítjuk, hibrid hálót nyerve.

3. A fejlesztett algoritmus

Ebben a részben ismertetjük a teljes algoritmust. A gyakorlatban a (10) formulában szereplő integrálokat nem szokás kiszámolni, helyettük az α, β hiperparaméterek *a posteriori* eloszlásából következtetnek az optimális $\alpha_{opt}, \beta_{opt}$ értékekre, majd gradiens visszaterjesztés segítségével minimalizálják (3) és (4) hibaformulák összegét.

Az *a priori* eloszlások megválasztása nem egyszerű feladat, az egyszerűség kedvéért noninformatív eloszlást választottunk a [3] munka javaslata alapján: legyenek $\alpha \sim \mathcal{U}(0, I_\alpha), \beta \sim \mathcal{U}(0, I_\beta)$ egyenletes



4. ábra: A kimeneti réteg szemléltetése

eloszlásúak valamilyen I_α és I_β pozitív számokkal. Kiszámítandó tehát a (9)-beli integrál, amelyet jelöljünk Z -vel. Ez az integrál $W + 2$ dimenziós, ahol W a háló éleinek számát jelöli.

A beágyazott mintavételezés algoritmusában az $L(\mathbf{w}, \alpha, \beta)$ likelihood függvény és a $\pi(\mathbf{w}, \alpha, \beta)$ *a priori* eloszlás az alábbiak $\alpha \in [0, I_\alpha]$, $\beta \in [0, I_\beta]$ és $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^W$ esetén.

$$L(\mathbf{w}, \alpha, \beta) = \left(\frac{\beta}{2\pi} \right)^{MN/2} \exp \left(-\frac{\beta}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (t_n^{(m)} - y_n(\mathbf{x}^{(m)}, \mathbf{w}, \alpha, \beta))^2 \right) \quad \text{és} \quad (11)$$

$$\pi(\mathbf{w}, \alpha, \beta) = \left(\frac{\alpha}{2\pi} \right)^{W/2} \frac{\exp \left(-\frac{\alpha}{2} \sum_{j=1}^W w_j^2 \right)}{I_\alpha I_\beta}$$

A (11) formulában a hálózat $y_n(\mathbf{x}^{(m)}, \mathbf{w}, \alpha, \beta)$ kimenetének α és β argumentuma arra utal, hogy azt egyértelműen meghatározza a Tikhonov-regularizáció. A π *a priori* eloszlásunkból úgy generálunk egy $\theta \in \mathbb{R}^{W+2}$ véletlen vektort, hogy veszünk $\alpha \sim \mathcal{U}(0, I_\alpha)$, $\beta \sim \mathcal{U}(0, I_\beta)$ véletlen számokat (ezek lesznek θ utolsó két komponense), majd generálunk W darab standard normális eloszlású véletlen számot, és ezek mindegyikét megszorozzuk $\alpha^{-1/2}$ -nel, így normális eloszlásúak lesznek $1/\alpha$ szórásnégyzettel. Adott θ helyen L úgy számolható, hogy a hálót kiértékeljük θ első W darab komponensével adott súlyszettel, a kimeneti élek súlyát pedig α/β paraméterű Tikhonov-regularizáció segítségével határozzuk meg, melyek θ utolsó két komponensei. A teljes algoritmust a 3. [pszeudokódban](#) foglaltuk össze.

3. Algoritmus: A fejlesztett algoritmus

Legyenek $\mathbb{R}^{W+2} \ni \theta_j \sim \pi$, $j = 1, \dots, N$ véletlen vektorok. $Z := 0$ és $X_0 = 1$, $f \in \mathbb{R}$ toleranciaküszöb adott az integrálhoz, továbbá Q egy $W + 2$ dimenziós jelölt eloszlás és $F \in \mathbb{N}$ fix lépésszám a Metropolis-algortimushoz, azaz adottak $L(\theta_1), \dots, L(\theta_N)$ kezdeti likelihoodok.

$Z = 0$; $X_0 = 1$; $j = 0$;

while $\max\{L_1, \dots, L_N\} X_j < \text{tol} \cdot Z_j$ **do**

$j = j + 1$; $X_j = \exp(-j/N)$; $w_j = X_{j-1} - X_j$;

Keressük meg a legkisebb likelihood értéket, ez tegyük fel, hogy θ_i esetén vétetik fel.

$Z = Z + L(\theta_i)w_j$;

Legyen $\tilde{\theta}_0$ a tárolt θ_j ($j = 1, \dots, N$) elemek közül véletlenszerű;

for $n = 0 : F$ **do**

generáljunk véletlen $\tilde{\theta}^*$ mintát a Q jelölt eloszlásból, azaz $\tilde{\theta}^* | \tilde{\theta}_n \sim Q(\tilde{\theta}^* | \tilde{\theta}_n)$;

számítsuk ki a γ elfogadási valószínűséget $\gamma = \min \left(1, \frac{\pi(\tilde{\theta}^*)}{\pi(\tilde{\theta}_n)} \right)$;

generáljunk egy $u \sim \mathcal{U}(0, 1)$ véletlen számot;

if $u \leq \gamma$ és $L(\tilde{\theta}^*) > L(\theta_i)$ **then**

| $\tilde{\theta}_{n+1} := \tilde{\theta}^*$

else

| $\tilde{\theta}_{n+1} := \tilde{\theta}_n$

end

end

Cseréljük ki $L(\theta_i)$ -t erre az $L(\tilde{\theta}_{F+1})$ -re, illetve θ_i -t a talált $\tilde{\theta}_{F+1}$ -re.

end

$Z = Z + X_j (L(\theta_1) + \dots + L(\theta_N)) N^{-1}$;

return Z

1. táblázat: A [7] munka 9. táblázatában szereplő 5×2 keresztvalidáció eredménye

Módszer	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Átlaghiba [MWh]	5,426	4,561	4,572	5,399	8,487	4,561	4,563	4,656
Módszer	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	
Átlaghiba [MWh]	3,861	8,221	5,556	3,779	4,128	4,087	4,211	

4. Numerikus eredmények

Választott modellünk témája, egy alapterhelésen működő, kombinált ciklusú erőmű teljes töltésnél mért elektromos kimenetének becslése [7]. Ez egy általános approximációs probléma a gépi tanulás módszereivel, viszont megoldása fontos hatékonysági és gazdasági szempontból egyaránt. A rendszer működését négy fő paraméter befolyásolja, amelyeket bemeneti változóként használnak az adathalmazban. Ezek az adatok, egy több, mint hat éven át tartó mérési sorozat eredményei, összesen 9 568 darab bemeneti-kimeneti adatpárt tartalmaznak, ahol minden mérési adat egy óránkénti átlag, melyet az erőmű szenzorai rögzítettek. A bemenő adatok a környezet hőmérséklete, a légköri nyomás, a relatív nedvességtartalom, valamint a kiáramló gőznyomás.

A szerzők a különböző módszereket 5×2 keresztvalidáció segítségével hasonlították össze, ez azt jelenti, hogy a teljes adathalmazt 5 alkalommal véletlenszerűen két részre osztották, a halmaz egyik felét tanításra használták, a másik felén pedig tesztelték a tanított modellt, majd felcserélték a két halmaz szerepét. Az 5×2 keresztvalidációban a módszer hatékonyságát a 10 teszthalmazon vett hiba átlaga adja: minél kisebb, annál jobb a módszer. A [7] munkában 15 módszert hasonlítottak össze így a szerzők, az erre vonatkozó eredményeiket láthatjuk az [1. táblázatban](#).

Az alábbiakban ismertetjük szimulációs eredményeinket. Egy darab rejtett réteggel rendelkező előreccsatolt hálózatokat hasonlítottunk össze eltérő neuronsszámmal a rejtett rétegben, ahol az aktivációhoz a szigmoid függvényt választottuk, valamint a kimeneti rétegen α/β paraméterű Tikhonov-regularizációt alkalmaztunk. Az adatsor véletlenszerűen kiválasztott felén végeztük a hálók tanítását az előző fejezetben ismertetett algoritmussal, az adatsor másik felén pedig kiértékeljük őket. Ezen eredmények a [2. táblázatban](#) láthatóak, amelyekben a rejtett rétegbeli neuronok számát R jelöli, a tanító halmazon számolt négyzetes középhibát és a validációs hibát pedig T és V . A Bayes-faktor a $p(\mathcal{G}_R|D)/p(\mathcal{G}_{10}|D)$ kifejezés logaritmusát jelenti (a nagyobb érték a jobb).

5. Következtetések

Munkánk során azt vizsgáltuk, hogy neurális hálózatokra alkalmazva a Bayes-becslést az *a posteriori* becslések során a különböző modellek közül hogyan válasszuk ki a tanító adatoknak leginkább megfelelőt. Mindehhez egy sokdimenziós integrál kiszámítása szükséges, amelyre a beágyazott mintavételezést alkalmaztuk. Megmutattuk, hogyan lehet ötvözni a gradiens visszaterjesztéses és a véletlen bolyongásos tanítást hibrid hálózatokat nyerve. A módszer hasznosságát numerikus kísérletekkel támasztottuk alá. Szimulációink kimenetét a [7] munka [1. táblázatban](#) látható eredményeivel összehasonlítva azt állíthatjuk, hogy az általunk alkalmazott módszer validálási hibája még a legkevesebb neuronsszám esetén is a 15 módszerrel összevetve a 3. legjobb. A Bayes-faktor segítségével azt is meg-

2. táblázat: Szimulációs eredmények $N = 100$ hálózattal

R	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
T [MWh]	3,895	3,823	3,843	3,839	3,875	3,853	3,849	3,860	3,953	3,926
V [MWh]	4,062	4,000	4,017	3,984	4,056	4,032	3,994	4,043	4,080	4,075
Bayes-faktor	0,0	-41,4	38,3	82,4	-340,2	-161,0	-67,0	-212,6	-74,2	4,9

állapíthatjuk, hogy 40-nél több neuront alkalmazni a rejtett rétegben túlillesztéshez vezet, amelyet alátámaszt, hogy a validációs hibák ennél nagyobb hálózat esetén már nem csökkennek. A legkisebb validációs hibához tartozik a legnagyobb Bayes-faktor, melyet a 40 rejtett rétegbeli neuronnal rendelkező hálózat esetén figyelhetünk meg, vagyis ez az optimális választás az általunk vizsgált hálózatok közül.

6. Köszönetnyilvánítás

A kutatást a 2019-1.3.1-KK-2019-00011 számú projekt támogatta, ami a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a „KOMPETENCIA KÖZPONTOK LÉTREHOZÁSA- KUTATÁSI INFRASTRUKTÚRA FEJLESZTÉS” pályázati program finanszírozásában valósult meg. Továbbá ezen munka elkészítése során a Kormányzati Információs Fejlesztési Ügynökség (KIFÜ) szuperszámítógépes infrastruktúráját használtuk.

7. Irodalomjegyzék

- [1] D.E. Rumelhart, G.E. Hinton, R.J. Williams, *Learning representations by back-propagating errors*, Nature 323, 1986, pp. 533-536, [CrossRef](#)
- [2] Horváth G., Altrichter M., Horváth G., Pataki B., Strausz Gy., Takács G., Valyon J., *Neurális hálózatok*, Budapest, Panem Kiadó, 2006.
- [3] C.M. Bishop, *Bayesian methods for neural networks*, in L. Tarassenko, E. Rolls, D. Sherrington (Eds.), Oxford Lectures on Neural Networks, Oxford University Press., 1995.
- [4] J. Skilling, *Nested sampling for general Bayesian computation*, Bayesian Anal. 1(4), 2006, pp. 833-859, [CrossRef](#)
- [5] D.L. Phillips, *A Technique for the Numerical Solution of Certain Integral Equations of the First Kind*, Journal of the ACM 9, 1962, pp. 84-96, [CrossRef](#)
- [6] W.K. Hastings, *Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications*, Biometrika 57, 1970, pp. 99-109, [CrossRef](#)
- [7] P. Tüfekci, *Prediction of full load electrical power output of a base load operated combined cycle power plant using machine learning methods*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems 60, 2014, pp. 126-140, [CrossRef](#)

RENDEZETLEN ALKATRÉSZEK RAKODÁSI FOLYAMATÁNAK FEJLESZTÉSE

Magyar Gergely^a, Sebestyén László Ádám^a, Magyar Gábor^b, Andó Mátyás^{c*}

^a ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, Gépészmérnöki BSc, 4. évf.

^b BPW-Hungária Kft., gyártásautomatizálási csoportvezető

^c ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, egyetemi docens

ABSZTRAKT

Ebben a cikkben egy automatizált rakodó (bin-picking) rendszer kialakításának, illetve tovább fejlesztésének lépéseit fogjuk bemutatni. A rendszernek a feladata, hogy a rendezetlenül szállított tengelycsonkokat egy robot rendezetten a palettára helyezze. Az automatizált rendszer két elemét fogjuk részletesen bemutatni: a robotprogramot és forgató asztal működését. Kitérünk a robotprogram fő és alprogramjai közötti összefüggésekre és a működéshez megfelelő struktúra megvalósítására. A forgató asztal működésének fejlesztését több lépésen keresztül mutatjuk be, szisztematikus mérésekkel igazolva az eredményeket. A rendszer működőképességét azóta több ezer kipakolás is igazolja.

Kulcsszavak: *bin-picking, robot, automatizálás*

1. Bevezetés

A futóműgyártás folyamatának egyik jellegzetes eleme a futóművek végén található tengelycsonkok gyártása. Ezek az alkatrészek félkész állapotban (előgyártmányként) kerülnek a gyártási folyamatba, ahol további megmunkálásokat végeznek el rajtuk. Szállításuk úgynevezett ládákban (vagy más szóval kalodákban) történik, melyekben a tengelycsonkok szabadon el tudnak mozdulni. Vagyis ömlesztett áruként érkeznek, rendezetlenül töltve ki a kalodát. Annak érdekében, hogy a megmunkáló központok kiszolgálása megfelelő legyen, valamilyen rendezett formában kell az alkatrészeket továbbítani. Korábban ezt a rendezési feladatot a megmunkáló központoknál dolgozó alkalmazottak végezték el. A tengelycsonkokat egyesével pozicionálták egy palettára, az emeléshez kézi darut használtak. Ez egy rendkívül lassú és körülményes folyamat, amely jelentős időt vesz igénybe. Ezért célunk egy olyan rendszer létrehozása volt, amelyben a tengelycsonkok mozgatása robottal történik, illetve pozícióba forgatása is teljesen automatizált.

Az ömlesztett vagy rendezetlen áruk rakodására kifejlesztett automatizált rendszereket angolul „bin-picking” rendszereknek nevezzük. Ezek a rendezetlen áruk/alkatrészek egy tároló egységben vagy akár egy felületen helyezkednek el és valamilyen meghatározott elv alapján rendezzük ezeket [1]. Ehhez szükséges az alkatrészhalmoz detektálása, melyet különböző szenzorok és mérőeszközök összességéből álló rendszer biztosít. A detektálás után különböző algoritmusok vagy mesterséges intelligencia meghatározza azokat a darabokat, melyek mozdíthatók és továbbíthatóak a következő állapotba. A mozgatáshoz különböző típusú robotokat alkalmaznak, talán a legelterjedtebb a 6-tengelyes robotok alkalmazása, amivel a teljesen szabadon elhelyezkedő munkadarabok is rugalmasan megfoghatók [2, 3]. Hasonló felhasználásokra akár delta robotok alkalmazása is megfelelő, jellemzően akkor, ha a munkadarabok síkfelületen helyezkednek el, illetve nagy sebességű robotmozgásra van szükség (például szállítószalagokon történő válogatás) [4]. Ezekon felül még SCARA robotok használata is előfordul, rezgőtálcás kiegészítéssel, amennyiben ugyancsak síkfelületen helyezkednek el az alkatrészek és a rakodás sebességigénye nem kritikus [5].

Az alkatrészek megfogáshoz gyakran univerzális két-három-négyujjas megfogókat használnak [6], de alkalmaznak speciális megfogószerkezeteket is, melyek például pneumatikus vagy mágneses elven működnek [7]. Továbbá léteznek olyan rendszerek is, amelyek több megfogó használatát teszik lehetővé, ezzel biztosítva több különböző alkatrész hatékony mozgatását [8, 9].

A rendszer kezdeti beüzemelési tapasztalatai alapján, a különböző helyzeteket lekezelő robotprogram fő elveinek és a pozicionáló asztal fejlesztésének bemutatását tűztünk ki célul.

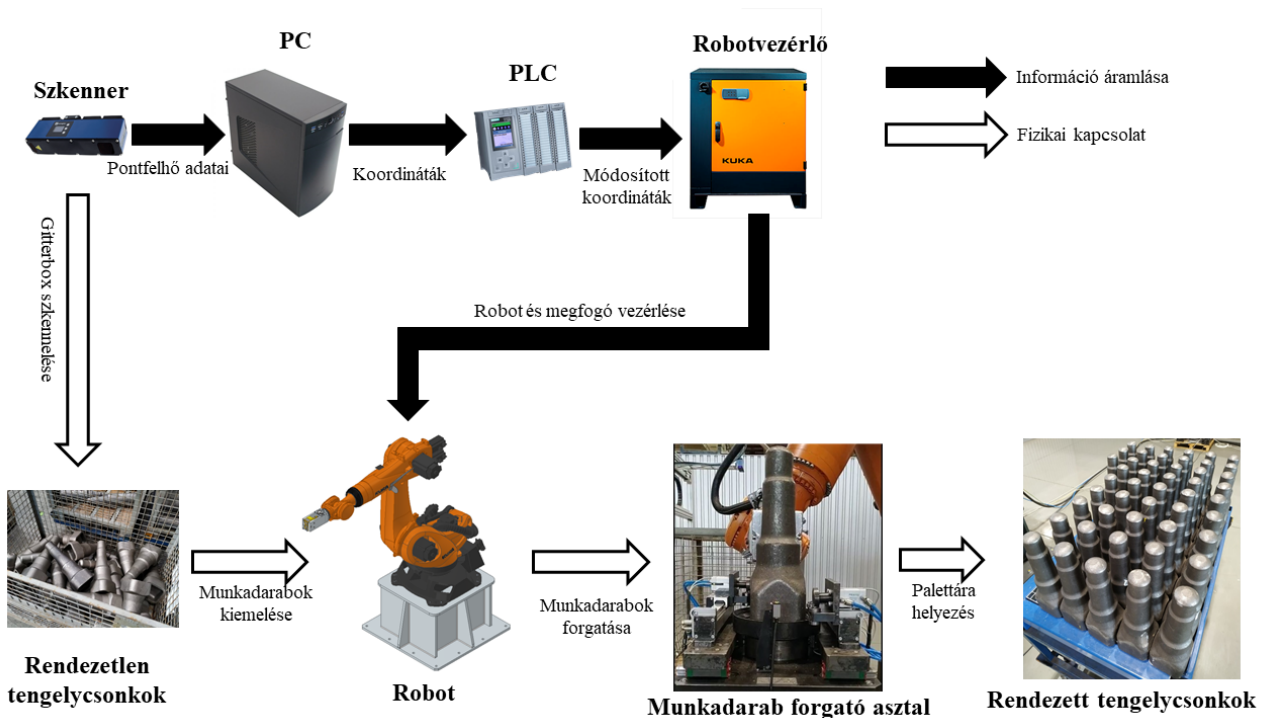
2. Anyag és módszer

A mozgatáshoz egy KUKA KR120 R2700 típusú hattengelyes robotot használtunk (120 kg teherbírással, 2701 mm karkinyúlással, 0,05 mm ismétlési pontossággal), amely egy MS-8140405 típusú permanens mágneses megfogóval és a rajta lévő egyedi tervezésű prizmákkal biztosítja a tengelycsonkok megfogását. A Wenglor MLSL255 típusú kontúrszkenner (kék fényű, 3R-es biztonsági osztályú lézerefényt bocsát ki, illetve a képalkotás során mozgatni szükséges) végigpásztazza a láda tartalmát, majd egy szoftver a feldolgozás után meghatározza a kivehető tengelycsonk koordinátáit és irányát. Az adatokat egy Siemens S7-1500-as PLC továbbítja a robotvezérlőnek. A robot az adott darabot először a forgató asztalra helyezi, ahol a darab pontos helyzetbe forgatása megtörténik, majd a robot átemeli a darabot a palettára. A folyamatot az 1. ábra szemlélteti.

3. Robotprogram működési logikájának megalkotása

A tengelycsonkok véletlenszerű helyzetéből adódóan a kikapolás során több jellemző eset is kialakulhat a kalodában. A robotprogramnak ezeket az eseteket kell azonosítani és megfelelően lekezelni a folyamatos működés érdekében. Az azonosított esetek a következők voltak:

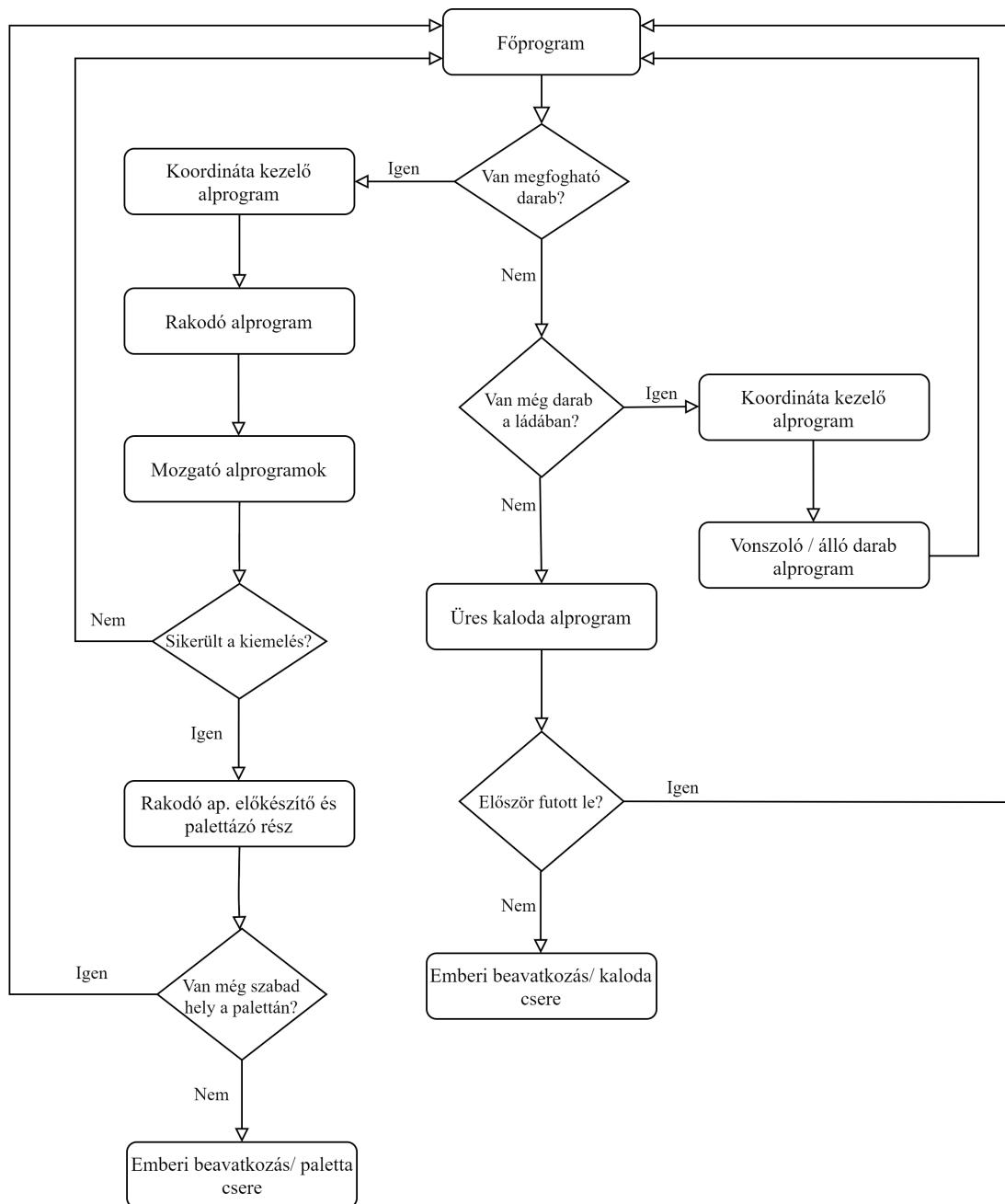
1. a háromdimenziós modellel történt összehasonlítás után van kivehető darab és sikerült a kiemelése,
2. a háromdimenziós modellel történt összehasonlítás után van kivehető darab, de nem sikerült a kiemelése,



1. ábra: Rendszer elemeinek kapcsolódása

3. a háromdimenziós modellel történt összehasonlítás után nincs kivethető darab, de a munkadarabok átrendezésével már lehet kivethető darab,
4. a háromdimenziós modellel történt összehasonlítás után nincs kivethető darab, de darab potenciálisan elhelyezkedhet a holttérben,
5. a háromdimenziós modellel történt összehasonlítás után nincs kivethető darab és a láda üres,
6. a munkadarab palettára helyezése után nincs továbbinak hely a palettán.

Az eseteket azonosítva a szükséges cselekvés is meghatározható. Ezeket figyelembe véve megalkottuk a kiber-fizikai rendszer munkafolyamatának modelljét (2. ábra), amely tartalmazza az aktív beavatkozási pontokat is.



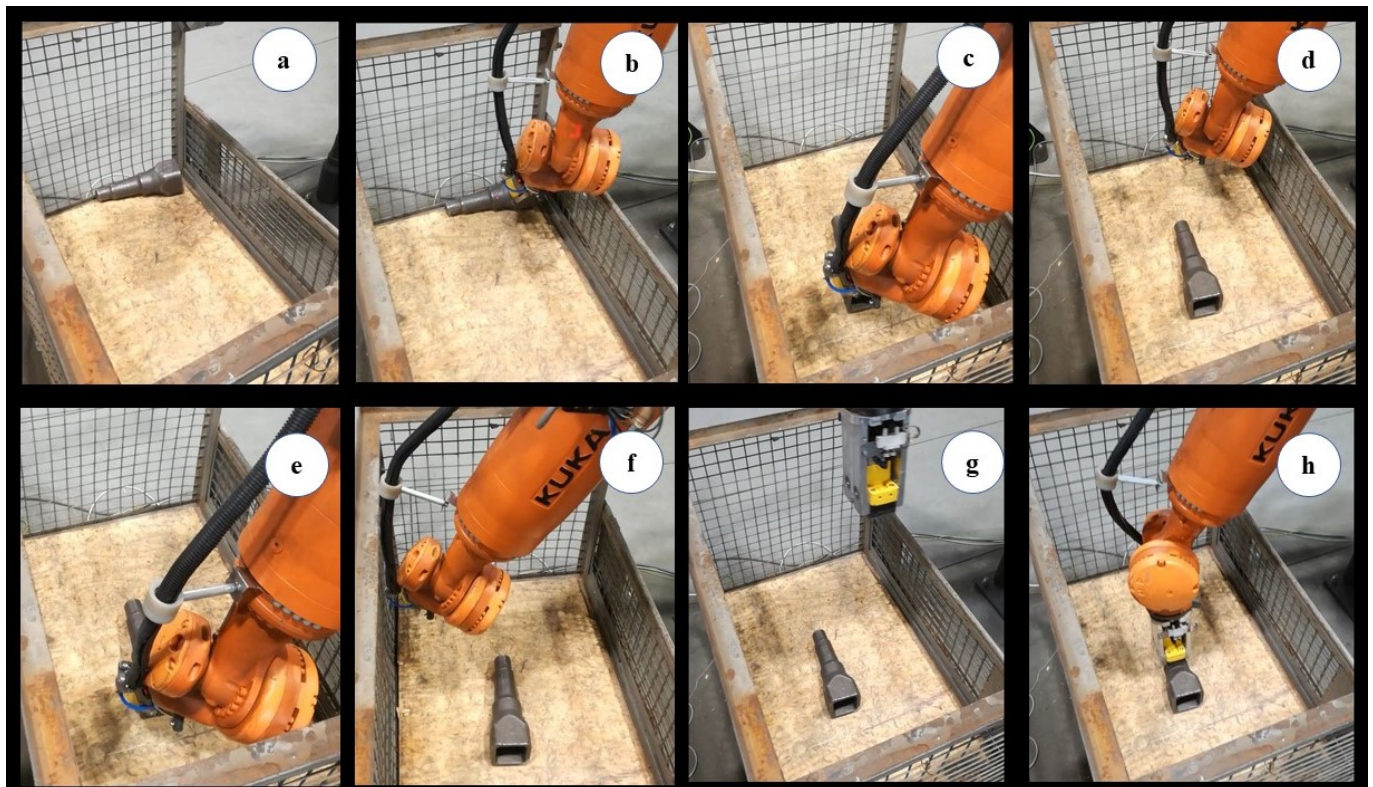
2. ábra: Robotprogram munkafolyamatának modellje

Alap működés esetén a háromdimenziós modellel történt összehasonlítás után van kivehető darab és sikerült a kiemelése is. Ez a rendszer működésének optimális esete. Amennyiben ez megtörtént egy következő szkennelési ciklussal folytatódhat a folyamat. Az utolsó ilyen beavatkozási pont akkor van, amikor a munkadarab palettára helyezése után nincs továbbinak hely a palettán (2. ábra, Emberi beavatkozás / paletta csere). Ekkora a folyamat megáll és a paletta cseréje után folytatódhat csak tovább a kirakodás. A második aktív beavatkozási pont az, amikor a kaloda kiürült. Ekkora a folyamat leáll és a munkadarabokat tartalmazó láda cseréje szükséges. Ezután újraindulhat a folyamat (2. ábra, Emberi beavatkozás / kaloda csere).

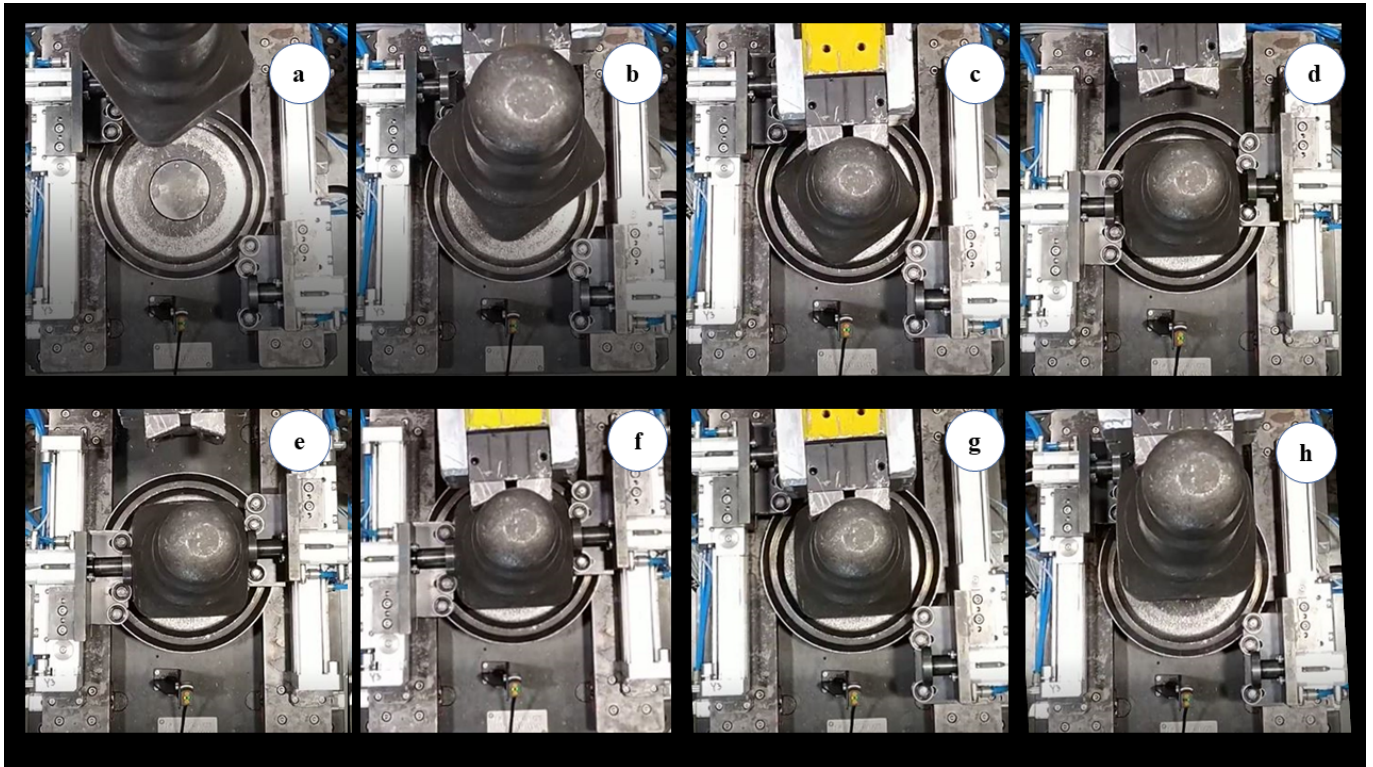
A harmadik beavatkozási pont, ha a modellel való összevetés során első alkalommal nem találunk megfogható darabot és a szoftver szerint nincs is alkatrész a ládában. Ilyenkor megvan az esély arra, hogy a láda széle által keltett holtterben nem érzékeljük a munkadarabot. Ekkor egy alprogramot hívunk meg, amely olyan robotmozgást tartalmaz, ami kimozgathatja a holtteréből a munkadarabot, így a következő szkennelés során a munkadarab érzékelése megtörténhet (2. ábra, Üres kaloda alprogram). Ennek az alprogramnak a működését mutatja be a 3. ábrán látható képsorozat. Az a) képen megfigyelhető a holtterben lévő alkatrész. Látható, hogy az alkatrész középre mozgatása már a c) képen megtörtént, de ettől függetlenül a többi lehetséges helyet is ellenőrizni kell. A h) képen látható az alkatrész megfogása az újabb szkennelés után.

A negyedik beavatkozási eset, ha nincs kivehető darab és ezért át kell rendezni a kaloda tartalmát. Ehhez szükség volt olyan alprogramra, amiben a robot nem kiveszi a munkadarabot, mindössze megváltoztatja a helyzetét a ládában. Külön kell kezelni azokat az eseteket, amikor a munkadarab helyzetét elegendő vízszintes irányban megváltoztatni, illetve amikor szükséges függőleges irányú mozgást is végezni. Előfordulhat olyan eset is, hogy a munkadarab álló helyzetben helyezkedik el a ládában, erre is külön mozgatási funkcióval kell készülni (2. ábra, Vonzoló / álló darab alprogram).

Ötödik eset, ha a háromdimenziós modellel történt összehasonlítás után van kivehető darab, a megfogás meg is valósult, azonban a kiemelése nem sikerült. Ennek az ellenőrzésére egy optikai



3. ábra: Üres kaloda alprogram folyamatának lépései



4. ábra: Munkadarab-forgatás lépései

szenzor van felhelyezve a megfogó szerkezetre, amely azt figyeli, hogy a kiemelés során a munkadarab a megfogó szerkezetben marad-e. Amennyiben nem, a kiemelési procedúra megáll és egy új szkennelési ciklus indul el.

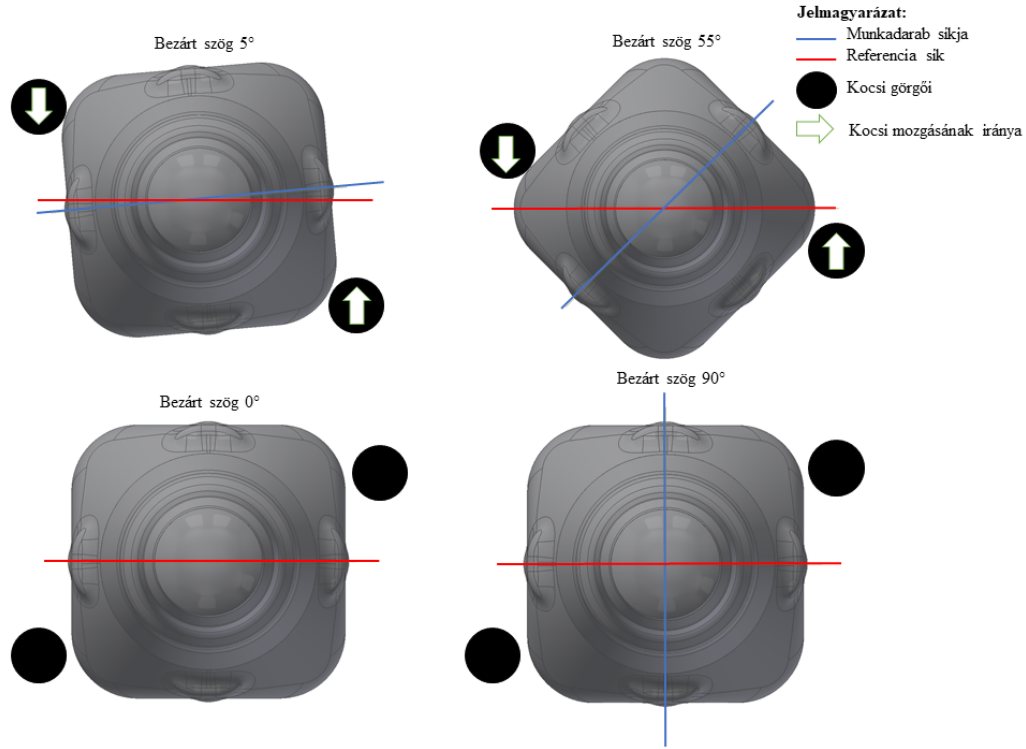
Az eseteket rögzítésük és a beavatkozási megoldások kidolgozása után olyan strukturált robotprogramot készítettünk el, ami stabilan tudja szolgálni a kipakolást. A logikai egymásra épülés miatt az esetektől függően a robot mindig az optimális beavatkozást fogja elvégezni.

4. Munkadarab-forgató asztal fejlesztése

A rendszer tervezése és megépítése után megkezdődött a tesztelési fázis. A kezdeti tesztek során jelentkező problémák közül az előkészítő asztal beszorulásait mutatjuk be. A 4. ábrán látható munkadarab-forgató asztalon elhelyezett kocsik lineárisan mozognak és a tengelycsonk oldalával érintkezve elforgatják azt. Az *a)-c)* képig munkadarab behelyezése, *d)-e)* képen a darab befogatása a kocsik segítségével és *f)-h)* képen pedig a kiemelés folyamata látható. Azonban megfigyeltük, hogy bizonyos munkadarab pozíciók esetén a két kocsi közé beszorult a munkadarab és a forgatás nem történt meg.

Az első kísérletekkel meghatároztuk azokat a helyzeteket, ahol a beszorulás előfordul. A tengelycsonkok négyzet keresztmetszetűek, ezért elég volt 0° és 90° közötti helyzeteket vizsgálni. Öt azonos típusú, de különböző munkadarabon egy fokenként forgatva, minden pozíciót háromszor ellenőrizve végeztük el a kísérleteket. Megfigyeltük, hogy a kocsik a rajtuk lévő görgőkkel vagy elgördülnek a tengelycsonk sarkai mellett, vagy a sarkon felülkötözve eltolják azt a következő síknegyedbe (5. ábra). Például, ha a két vizsgált sík bezárt szöge 5° , akkor a kocsik elgördülnek a sarok mellett, és a rajtuk található egyenes rész 0° -os helyzetbe állítja a munkadarabot. Azonban, ha a két vizsgált sík bezárt szöge 45° , akkor a kocsi felülkötözik a munkadarab sarkán, és a kocsi 90° -os helyzetbe forgatja a darabot.

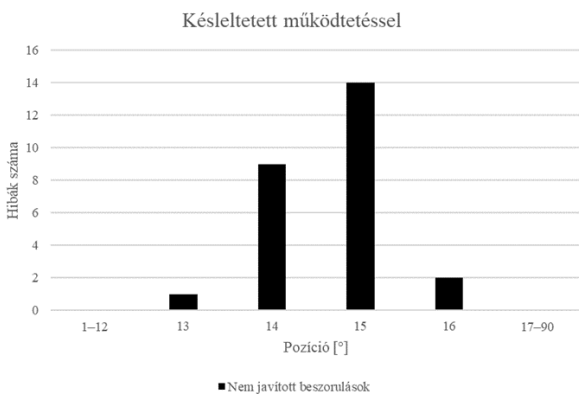
A kritikus helyzet a két jellemző forgatási mód közötti szöghelyzetekben történt, 13° és 16° -os helyzetnél. Ezek alapján meghatároztuk azt a vizsgálati eljárást, amivel a konstrukciós módosítások



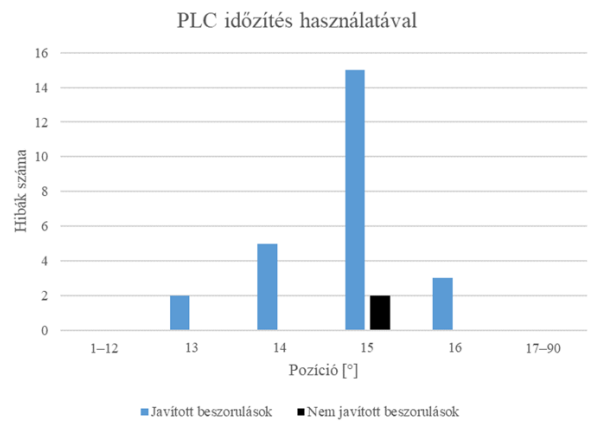
5. ábra: A munkadarab szöghelyzeteinek szemléltetése

sikerességét ellenőrizni fogjuk. 0° és 12° között, valamint 17° és 90° között minden értékre háromszor, míg 13° és 16° között minden értékre 10-szer kell elvégezni a forgatási vizsgálatot, mind az öt darab esetén. Az első konstrukciós változtatásnál a kocsik mozgatása el volt egymáshoz képest hangolva fojtószelepek segítségével. A mérések azt mutatták, hogy ez a megoldás nem segített elkerülni a beszorulásokat (6. ábra). Látszik, hogy továbbra is csak a 13-16° közötti tartomány a kritikus, máshol beszorulást nem tapasztaltunk.

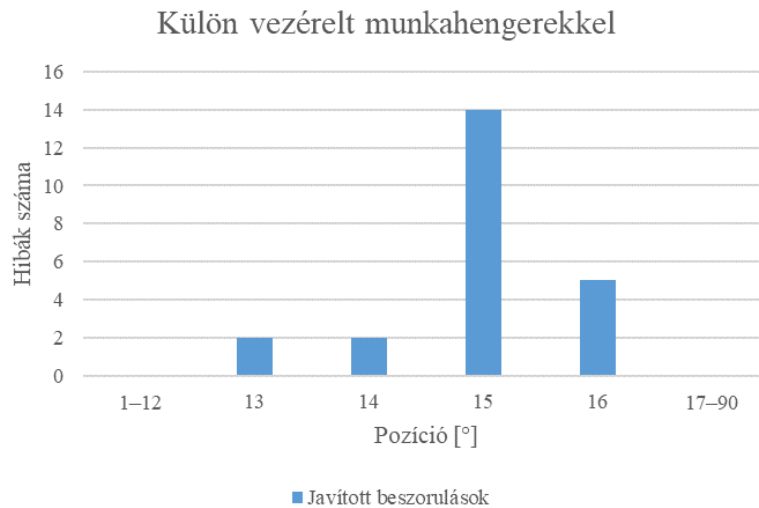
A második megoldás a PLC program módosítása volt. Amennyiben beszorulás lépett fel a forgatás során, egy adott idő lejárta után a kocsik visszatértek az alap állapotba, majd újra megkísérelték a forgatást. Itt már a beszorulások jelentős mennyiségét sikerült javítani (7. ábra). Látszik, hogy a beszorulások nagy részét ezzel a plusz mozgással korrigálni lehetett. A 25 beszorulásból csupán két esetben nem volt működőképes a megoldás. Sajnos ez az érték azonban még mindig nem elfogadható a stabil működés biztosításához.



6. ábra: Elhangolt kocsikkal történt mérési eredmények



7. ábra: Időzítés alkalmazásával végzett mérési eredmények



8. ábra: Külön vezérelt munkahengerekkel végzett mérési eredmények

A végső megoldásnak az bizonyult, hogy külön szelepekkel vezéreltük a kocsikat mozgató munkahengereket, így amikor beszorulás történik, a munkahengerek alapállapotba állnak vissza, majd csak az egyik lép mozgásba, ezután késleltetve a másik. A 8. ábrán látszik, hogy így már minden beszorulást sikerült javítani. Vagyis a forgató asztalon a darab mindig pozícióba forgatható.

5. Összefoglalás

A cikkben röviden bemutatottuk a rendszer alapvető elemeit, a közöttük lévő kapcsolatokat, illetve a működésének az elvét. Utána bevezettük az alkalmazott robotprogram munkafolyamatának modelljét, amely minden munkadarab elhelyezkedésre mozgató alternatívát nyújt. Az munkafolyamat modelljében bemutatott aktív beavatkozási pontok részletesen is ismertettük, amely biztosítja az optimális működését a folyamatnak. Végül egy, a fejlesztés során előkerülő probléma több lépcsős megoldását is bemutatottuk. Az egyes megoldások helyességét tesztekkel is alátámasztottuk.

A felépített architektúra megfelelően működött már több ezer darab kipakolása során, így a robotprogram struktúráját ebben a formában véglegesítettük. Elmondható, hogy ez a koncepció a kalodában bármilyen orientációban elhelyezkedő munkadarabok kivételére alkalmas. További tapasztalat, hogy a forgató asztal beszorulásai nem befolyásolják nagymértékben a kipakolási időtartamot, hiszen csak esetlegesen fordulnak elő, illetve a szöghelyzet korrekciója is mindössze néhány másodpercet vesz igénybe.

6. Köszönetnyilvánítás

Készült az EFOP-3.5.1-16-2017-00012 „Duális és kooperatív felsőoktatási képzések, felsőoktatási szakképzési és szakirányú továbbképzések fejlesztése” című projekt keretében.

7. Irodalomjegyzék

- [1] D. Buchholz, *Bin-Picking – New Approaches for a Classical Problem*, Springer International Publishing, 2016, [CrossRef](#)
- [2] C. Zhuang, Z. Wang, H. Zhao, H. Ding, *Semantic part segmentation method based 3D object pose estimation with RGB-D images for bin-picking*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 68, 2021, 102086, [CrossRef](#)

- [3] K.N. Kaipa, A.S. Kankanhalli-Nagendra, N.B. Kumbla, S. Shriyam, S.S. Thevendria- Karthic, J.A. Marvel, S.K. Gupta, *Semantic part segmentation method based 3D object pose estimation with RGB-D images for bin-picking*, Addressing perception uncertainty induced failure modes in robotic bin-picking, Robot. Computer-Integrated Manufacturing 42, 2016, pp. 17-38, [CrossRef](#)
- [4] J.P. Barreto, B. Corves, *Resonant Delta Robot for Pick-and-Place Operations*. In: Uhl T. (eds) *Advances in Mechanism and Machine Science*, IFToMM WC 2019 Mechanisms and Machine Science 73, 2019, pp. 2309-2318, [CrossRef](#)
- [5] Z. Wang, Y. Xu, Q. He, Z. Fang, G. xu, J. Fu, *Grasping pose estimation for SCARA robot based on deep learning of point cloud*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 108, 2020, pp. 1217–1231, [CrossRef](#)
- [6] M. Moosmann, F. Spenrath, K. Kleeberger, M.U. Khalid, M. Mönnig, J. Rosport, R. Bormann, *Increasing the Robustness of Random Bin Picking by Avoiding Grasps of Entangled Workpiece*, Procedia CIRP, 93, 2020, pp. 1212–1217, [CrossRef](#)
- [7] M. Alonso, A. Izaguirre, M. Graña, *Current Research Trends in Robot Grasping and Bin Picking*, International Joint Conference SOCO'18-CISIS'18-ICEUTE'18, San Sebastián, Spain, 6–8 June 2018, pp. 367–376, [CrossRef](#)
- [8] M. Moghaddam, S.Y. Nof, *Parallelism of Pick-and-Place operations by multi-gripper robotic arms*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 42, pp. 135–146, [CrossRef](#)
- [9] A. Iriondo, E. Lazkano, A. Ansuategi, *Affordance-Based Grasping Point Detection Using Graph Convolutional Networks for Industrial Bin-Picking Applications*, Sensors 21(3), 2021, 816, [CrossRef](#)

TESZTBERENDEZÉS TÁVVEZETÉKRŐL LESZAKADÓ JÉG KELTETTE LENGÉSEK MODELLEZÉSÉRE

Lajber Kristóf^{a*}, Borbély Tibor^b, Kollár László^c, Szilvágyi Milán^d

^a ELTE Informatikai Kar, Savaria Műszaki Intézet, PhD hallgató

^b ELTE Informatikai Kar, Savaria Műszaki Intézet, egyetemi docens

^c ELTE Informatikai Kar, Savaria Műszaki Intézet, egyetemi tanár

^d ELTE Informatikai Kar, Savaria Műszaki Intézet, Gépészmérnöki BSc, 4. évf.

ABSZTRAKT

A cikk bemutatja egy elektromos távvezetékéről történő jégleválás modellezésére készült rendszer felépítését és működésének tesztelését. A valóságoshoz képest kicsinyített méretű vezetékmodell vezetékének befogásánál erőmérő cellák vannak beépítve a vezeték lengések közben fellépő erők mérésére. A vizsgálatok során a vezetékéről leszakadó jeget súlyok modellezik, melyek elektromágnessel lettek rögzítve a vezetékre. Az elektromágnessel vezérlésére egy egyedi, mikrovezérlő alapú vezérlőrendszer készült el. Ismertetjük a megvalósított vezérlőrendszer felépítését és a mérőrendszerrel való együttműködés képességének vizsgálatát.

Kulcsszavak: *vezérlő, távvezeték, lengések, jegesedés*

1. Bevezetés

A villamos távvezetéseket különböző természeti jelenségek következményeként olyan hatások érik, amelyek lengéseket okoznak. A lengések közben ható nagy erők rövid idő alatt károkat okozhatnak a távvezeték összetevőiben, de kisebb lengéseknek is lehetnek káros következményei, ha azok gyakran ismétlődnek, mert kifáradáshoz vezetnek. A nagyfeszültségű vezetékek ilyen lengéseit a lengés amplitúdója és frekvenciája alapján három fő csoportba soroljuk [1, 2]:

- A nagy amplitúdójú (összemérhető a belógással), kis frekvenciájú (0,1-1 Hz) úgynevezett „galoppozó” lengéseket a szél okozza. Ehhez hasonló, de időben csillapodó lengések alakulhatnak ki a vezetéken kialakult jég, vagy hó leválásakor. Ezek a lengések jelentős terhelésnövekedést jelentenek a befogásoknál.
- A közepes amplitúdójú és frekvenciájú (1-5 Hz) lengések kötegelt vezetékknél alakulhatnak ki, ahol az egyik vezetékéről leváló örvények gerjesztik a szomszédos vezetéket. Ezek a lengések kifáradáshoz vezethetnek.
- A szél okozhat kis amplitúdójú (vezeték átmérőhöz hasonló), nagy frekvenciájú (3-150 Hz) lengéseket. Ezek elsődlegesen kifáradásos sérülésekhez vezetnek.

A lengések okozta károk indokolják a kutatást a lengéseket okozó jelenségek megértése, valamint a keletkező lengések csillapítása céljából. A vezetékéről lehulló jég folyamatának és a létrejövő lengéseknek a modellezésére már több mint 50 évvel ezelőtt végeztek kísérleteket, ahol a jeget vezetékre rögzített súlyokkal vették figyelembe [3]. Később a jég okozta terhet több helyen rögzített tesztvezetékkel, a jég lehullását pedig a rögzítések eltörésével is modellezték [4]. Jég lehullását a vezetékéről laboratóriumi körülmények között többben is vizsgálták távvezeték kicsinyített modelljén [5, 6], beleértve azt az esetet, amikor az összes jég egyszerre hull le a vezetékéről [7], illetve amikor a jég lehullásának folyamata végighalad a vezeték mentén [8].

A jelen munka távlati célja az, hogy vizsgálni lehessen a távvezetésekről leszakadó jég hatására létrejövő lengéseket és azoknak az esetleges csillapítási lehetőségeit. A mostani fejlesztésnek a fő célja egy tesztberendezés létrehozása, különös tekintettel a vezérlőrendszerre.

2. A kísérleti modell és a vezérlőrendszer

A vizsgálathoz a távvezeték két feszítésváltóból álló kicsinyített modellje készült el a Savaria Műszaki Intézetben. A jégterhelés modellezésére szakaszonként 8 darab elektromágnessel rögzített súly szolgál. Ezeknek a súlyoknak az időzített elengedésével a vezetésekről leszakadó jég jelenségét lehet modellezni. A jegesedett vezeték éré erő nagysága határozza meg azt, hogy további jégdarabok leszakadnak-e. Ezt a súlyokat tartó erő változtatásával lehet modellezni ebben a rendszerben. A vezetékben ébredő erők mérésére a vezeték egyik végén háromtengelyes mérőcellákat építettünk be a rögzítési pontoknál.

2.1. Egyedi vezérlőrendszerrel szemben támasztott követelmények

A súlyok elengedésének időzítését ms pontossággal kell megvalósítani, hogy a leszakadás folyamata lehető legjobban közelíthető legyen. A jelenség modellezése szempontjából fontos, hogy az elengedés sorrendje, ideje és a szorító erő programozható legyen. Illetve az is követelmény, hogy ezek a paraméterek a vezérlőn futó program módosítása nélkül is beállíthatók legyenek. A rendszerrel szemben támasztott követelmények alapján egy mikrovezérlő alapú megoldást találtunk megfelelőnek az elektromágnesek vezérlésére.

2.2. A kísérleti modell és terhelések

A távvezeték modellezésére a laboratórium mennyezetére rögzítettük három tartókonzollal, egymástól 8,4 m távolságra, az [1. ábrán](#) látható módon kerültek rögzítésre. A konzolok közé lett kifizítve a [2. ábrán](#) látható módon a drótkötél, ami a vezetékot modellezi.



1. ábra: A vezeték rögzítése



2. ábra: A vezetékmodell

A súlyok csipesz-szerű mechanikával, elektromágnesek segítségével rögzíthetők a vezetékhez. Az elkészült megoldás a 3. ábrán látható. A feladathoz ITS-MS-2520-12VDC típusú elektromágneseket választottunk ki. A mágnesek tekercsei 12 V, névleges egyenfeszültségűek, és 4 W elektromos teljesítményűek, a névleges húzóerejük 60 N.

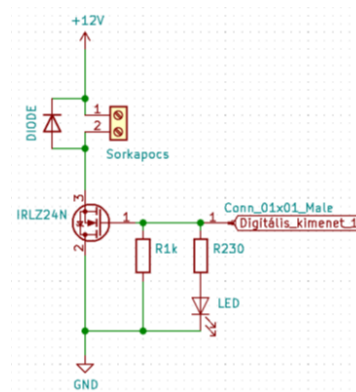
2.3. A vezérlőegység és program

A követelmények szerint 16 db PWM (Pulse Width Modulation – impulzusszélesség-moduláció [9]) kimenetre van szükség a megfogási erő vezérlésére, USB (Universal Serial Bus – szabványos soros adatátviteli módszer [9]) csatlakozásra és időzítő funkciókra. A Texas Instruments TM4C123GH6P fejlesztői panelja megfelelő megoldás volt a rendelkezésre álló, 16 csatornás dedikált PWM modullal, aminek minden csatornáját kivezették a fejlesztői panelen is. A vezérlő rendelkezik továbbá 27 db egyenként 32 bit-es időzítő modullal [10], amelyekkel további szoftveres PWM-csatornák hozhatóak létre. A fejlesztői panelen az USB kapcsolat gyárilag megvalósított, mivel a programozás és kommunikáció is ezen keresztül történik. A vezérlő 80 MHz-es órajele és egyszeres pontosságú lebegőpontos számító egysége megfelelő a feladathoz.

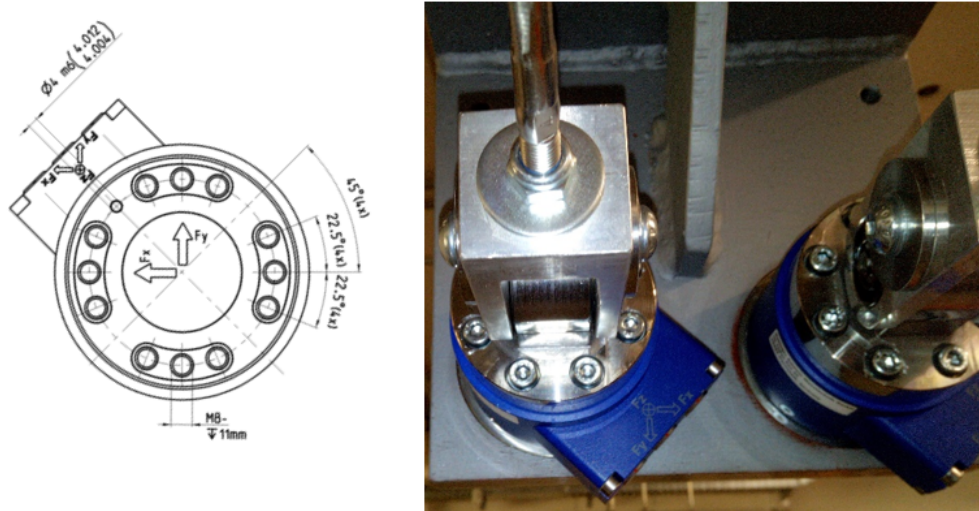
A vezérlőprogramot Visual Studio Code - PlatformIO IDE (Integrated Development Environment – integrált fejlesztőkörnyezet [9]) bővítményével készítettük, Energia keretrendszerben, C++ nyelven [11]. A vezérlőegységen futó program a hardver inicializálása után soros porton keresztül várja az utasításokat. Ezek az utasítások 8 bit-es karakterek formájában érkehetnek.



3. ábra: A súlyokat tartó csipesz a vezetéken



4. ábra: A tervezett MOSFET kimenetek egy csatornájának sematikus rajza



5. ábra: Az erőmérő cella műszaki rajza, az erőmérési irányokkal és a cellák beépítése [14]

2.4. Félvezetőalapú szintillesztés

A feladat kivitelezéséhez félvezető alapú teljesítményillesztést alkalmaztunk, így később a tartóerő állítása is megvalósítható. A MOSFET-es (FET, Field-Effect Transistor – térvezérlésű tranzisztor; MOSFET, Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor – szigetelt vezérlőelektródás FET [9]) jelszint illesztésnél olyan eszközt kellett választani, amely alkalmas az elektromágnesek 330 mA-es áramának kapcsolására. Mivel az elektromágnesek erősen induktív terhelések, így a kapcsolásukkor keletkező tranziens feszültségcsúcsoktól a rendszert meg kellett védeni.

A MOSFET-ek közül az IRLZ-24N típusút választottuk. Ennek a FET-nek a 18 A-es maximális névleges terhelhetősége és logikai jelszinttel való kapcsolhatósága előnyös volt a konstrukció szempontjából, mivel a FET-ek névleges terhelése és szükséges kapcsolási ideje nem teszi szükségessé a FET meghajtó modulok alkalmazását [12]. Az eszközök működési tartományának megfelelően megvalósított kapcsolást az 4. ábra mutatja be. A tranziens hatások ellen a gyakorlatban sokszor alkalmazott 1N4007 típusú diódákat építettünk be az elektromágnesekkel párhuzamosan záró irányba, ezt a 4. ábrán a DIODE felirat jelezi.

2.5. Adatgyűjtő- és mérőberendezések

Az adatgyűjtővel szemben támasztott követelmény az volt, hogy az erőmérő cellák jelét megfelelően tudja olvasni és rendelkezzen legalább 6 csatornával, amelyeken szimultán képes méréseket végezni. Ezért egy HBM QuantumX MX840B típusú adatgyűjtőt használtunk. Az adatgyűjtő 8 csatornája lehetővé teszi a két megvalósított vezetéken ébredő erők 3–3 tengely menti, szimultán rögzítését. A fennmaradó csatornák egyike használható úgynevezett trigger jel (olyan jel, amellyel az adatgyűjtés automatikusan elindítható) fogadására. Az eszköz előnye, hogy képes kezelni a jeladóba szerelt TEDS (Transducer Electronic Data Sheet – Jeladó elektromos adatlap) chipet, így a konfigurációs idő drasztikusan csökken [13]. Az adatgyűjtővel mért adatokat HBM CatmanEasy AP program segítségével rögzítettük.

A vezetékben ébredő erők méréséhez HBM MCS10-005-3C-FX-FY-FZ-00-00-00 típusú erőmérőcellákat alkalmaztunk. Az 5. ábrán jól látható az erőmérő cella és mérési irányai. A beépített formában az y -tengely függőleges, a z -irány a húzás- és az x -irány az oldalirányú erők mérésére szolgál. Az erőmérő műszer x és y -irányban 1 kN, z - irányban 5 kN méréshatárú.

1. táblázat: Vezérlőutasítások

Karakter	Funkció	Paraméter
p	kimenet száma	0-15 közötti
a	kimenet aktiválása	0-ki, 1-be
t	kiválasztott mágnes kikapcsolásának késleltetése	késleltetés ms-ban
r	mérés	1-mérés indul, 0-késleltetés törlése

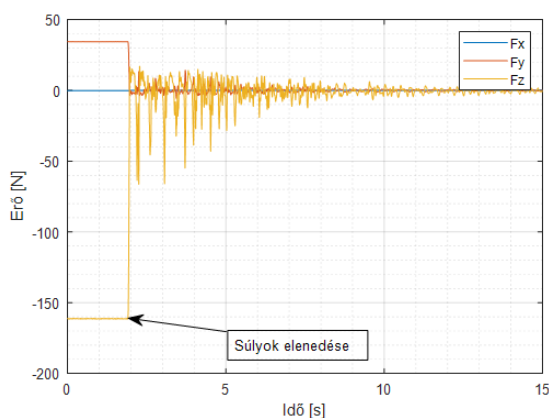
2.6. A vezérlőprogram kezelése

A vezérlővel történő, soros port alapú kommunikációhoz a PC (Personal Computer – személyi számítógép) oldalon valamilyen segédprogramra van szükség. A javasolt program a PuTTY nevű alkalmazás. Ezzel az alkalmazással könnyen lehet küldeni a szükséges vezérlőkaraktereket. Az elküldött karakterek nyomon követésére a programban érdemes bekapcsolni a local echo (helyi visszhang) funkciót, így a konzolon az elküldött üzenetek is megjelennek. Az üzenetek két részből állnak: egy karakter, amely a kívánt beállítandó funkciót választja ki, amit egy érték követ, amely az előbb kiválasztott funkcióhoz tartozó érték. A rendszer az 1. táblázatban felsorolt utasításokat ismeri fel a jelzett paraméterekkel.

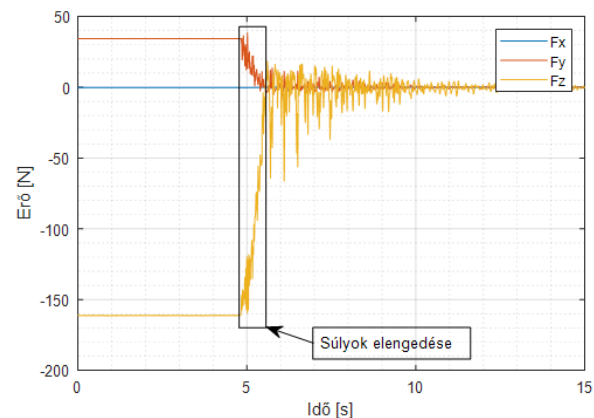
A beállított késleltetési idők nulla időpontja a mérés kezdete, így az azonos késleltetési idő megadásával az adott mágnesek egyszerre fognak elengedni. A vezérlő minden esetben idő szerint sorba fogja rakni a kimenetek kikapcsolását, így a késleltetési idők megadásának sorrendje nem számít.

3. Eredmények

A projekt során megvalósított rendszer használhatóságát a tesztmérések eredményein keresztül mutatjuk be. A méréseket egy vezetékszakaszon, 8 darab súllyal, két különböző időzítési sémát használva végeztük el. Minden mérésnél 8 darab, 800 g tömegű terhet használtunk. A mérés előtt a csatlakoztatott vezetékkel az erőmérő cellák által mért értéket nulláztuk, így csak a terhelések által okozott erőket mértük. A terheket az első esetben (6. ábra) egyszerre, míg a második esetben (7. ábra) 100 ms késleltetéssel engedték el. A méréseket 300 Hz-es mintavételi frekvenciával rögzítettük, és Matlab segítségével dolgoztuk fel. Az erők meghatározása a terhek leejtését megelőző statikus egyensúlyi helyzetben az első 300 rögzített adat átlaga alapján történt. Az így kapott eredmények a 2. táblázatban láthatóak.



6. ábra: Első mérés - terhek lehullajtása egy időben



7. ábra: Második mérés - terhek lehullajtása 100 ms időközönként

2. táblázat: Kiindulási erők az egyes méréseknél

	1. mérés	2. mérés
F_x [N]	-0.2542	-0.2548
F_y [N]	34,4460	34,4387
F_z [N]	-161,3028	-161,2719

A 6. és 7. ábrákat összehasonlítva jól látható, hogy ha az összes teher egyszerre hull le, akkor az erő z -irányú komponense nagyon gyorsan lecsökken (69 ms) és szinte rögtön kialakul a statikus érték körüli rezgés. Ha viszont a terhek lehullása 100 ms-onként történik, akkor az összes teher lehullása 0,7 s-ig tart (ábrán kerettel jelölve), így a statikus érték körüli lengés is csak ezután alakul ki. Ebben az esetben 10 s alatt -19,39 dB-el csökkent a lengések intenzitása. A fent rögzített eredmények összhangban vannak a mérések során tapasztaltakkal.

4. Irodalomjegyzék

- [1] EPRI, *Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA, 1979.
- [2] M. Farzaneh, *Atmospheric Icing of Power Networks*, Springer Science+Business Media B.V., 2008, ISBN: 978-1-4020-8530-7, [CrossRef](#)
- [3] V.T. Morgan, D.A. Swift, *Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads*, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers 111(10), 1964, pp. 1736–1746, [CrossRef](#)
- [4] P. Van Dyke, A. Laneville, *Simulated ice shedding on a full-scale test line*, Proc. 8th Int. Symp. Cable Dynam., Paris, France, 2009.
- [5] A. Jamaledine, G. McClure, J. Rousselet, R. Beauchemin, *Simulation of ice shedding on electrical transmission lines using ADINA*, Computers & Structures 47(4-5), 1993, pp. 523-536, [CrossRef](#)
- [6] G. Huang, B. Yan, N. Wen, C. Wu, Q. Li, *Study on jump height of transmission lines after ice-shedding by reduced scale modeling test*, Cold Regions Science and Technology 165, 2019, 102781, [CrossRef](#)
- [7] L.E. Kollár, M. Farzaneh, *Modeling sudden ice shedding from conductor bundles*, IEEE Transactions on Power Delivery 28(2), 2013, pp. 604–611, [CrossRef](#)
- [8] L.E. Kollár, M. Farzaneh, P. Van Dyke, *Modeling Ice Shedding Propagation on Transmission Lines with or without Interphase Spacers*, IEEE Transactions on Power Delivery 28(1), 2013. pp. 261-267, [CrossRef](#)
- [9] *Magyar elektronika*, letöltés dátuma: 2021.04.20, [url](#)
- [10] *Tiva™ TM4C123GH6PM Microcontroller DATA SHEET*, 2007-2014 Texas Instruments Incorporated
- [11] Benedek Z., Levendovszky T., *Szoftverfejlesztés C++ nyelven*, SZAK Kiadó, 2007, ISBN 978-963-9131-94-1
- [12] A. Kay, T. Green, *Analog Engineer's Pocket Reference*, Texas Instruments Incorporated, 2019.

-
- [13] *QuantumX MX840 Universal Amplifier Data Sheet*, Hottinger Brüel & Kjaer GmbH, letöltés dátuma: 2021.04.20, [url](#)
- [14] *MCS10 sensor datasheet*, letöltés dátuma: 2021.04.20, [url](#)



EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM

INFORMATIKAI KAR

SAVARIA MŰSZAKI INTÉZET

