

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**Végeselemes rendszerhez kapcsolt
optimalizáló eljárás fejlesztése
gumiütköző tervezéshez**

Huri Dávid

Témavezető: Dr. Mankovits Tamás



DEBRECENI EGYETEM

Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2022

Tartalomjegyzék

TARTALOMJEGYZÉK.....	I
1. BEVEZETÉS	1
2. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	4
2.1. Nyomó terhelésnek kitett gumiütköző viselkedésének numerikus modellezésére alkalmas hiperelasztikus anyagmodell	4
2.2. A térfogati rugalmassági modulus értékének megválasztása gumiütközők numerikus vizsgálata esetén	7
2.3. Helyettesítő modellek használata gumiütköző kétváltozós alakoptimalizálási feladata esetén.....	9
2.4. Szimulált hűtési algoritmus fejlesztése gumiütköző alakoptimalizálási feladatára, feladatspecifikus hiperparaméter-optimalizálási eljárás kidolgozása.....	11
2.5. Optimalizáló algoritmus hiperparamétereinek helyettesítő modell alapú adaptálása numerikus szimuláción alapuló feladatokra.....	14
JÖVŐBENI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK.....	17
IRODALOMJEGYZÉK	18
SZABVÁNYOK	21
PUBLIKÁCIÓS JEGYZÉK.....	22

1. Bevezetés

Kutatási munkám során a mérnöki életben előforduló tervezési feladatok megoldására alkalmas optimalizáló eljárás kidolgozásával foglalkoztam, melyhez egy gumiütköző numerikus szimuláción alapuló alakoptimalizálási feladatát választottam. Célként tűztem ki olyan zárt eljárás kidolgozását, mely emberi beavatkozás nélkül képes a szimuláción alapuló optimalizálási feladatokat a célfüggvény tulajdonságaitól függetlenül megoldani. Az eljárást a tervezési folyamatba integrált mesterséges intelligencia (szimulált hűtés, regressziós tartóvektor gép) eszközeivel valósítottam meg. A gumitermékek tervezése során a nemlineáris viselkedések (anyagi, nagy alakváltozás, kapcsolatok) miatt különös figyelmet kell fordítani a numerikus diszkretizáció folyamatára. Ezért megvizsgáltam a nyomó igénybevétel alatti anyagi viselkedés leírására alkalmas hiperelasztikus anyagmodelleket. Bemutattam a gumiütköző végeselemes vizsgálatához szükséges modellezési megfontolásokat, majd ismertettem a szimulációból adódó hibákat. Végül egy olyan kereső eljárás került kidolgozásra, mely az optimális kialakítást pontosan és költséghatékonyan képes meghatározni a gumiütköző alakoptimalizálási feladatára.

A fentiek alapján a kutatás első részében a gumitermék nyomó terhelés alatti működési karakterisztikájának végeselemes modellezésére alkalmas hiperelasztikus anyagmodell meghatározásával foglalkoztam. A légrugókban használt gumiütközők műszaki ellenőrzésekor az időfüggést nem veszik figyelembe, ezért a viszkózus és hiszterézis anyagi viselkedéseket, illetve a Mullins-hatást nem modelleztem. Ismertettem az ide vonatkozó kontinuummechanikai háttért, majd az energia alapon definiált hiperelasztikus anyagmodelleket. A termék gumikeverékének pontos összetétele ipari titok, ezért a késztermékből gumi próbatesteket munkáltam ki, amelyeken laboratóriumi méréseket végeztem. A hiperelasztikus anyagmodellek (Mooney-Rivlin, Yeoh, Gent, Arruda-Boyce, Ogden) illesztését a gumi nyomó igénybevételre felvett feszültség-alakváltozás karakterisztikáját

használva oldottam meg. Az anyagmodellek pontosságát a gumiütköző numerikus és laboratóriumi vizsgálatával értékeltem ki. A vizsgált gumiütköző geometriája és peremfeltételei tengelyszimmetrikusak, az alapanyag izotrop, ezért tengelyszimmetrikus elemet választottam a végeselemes diszkretizációhoz. Az eredmények alapján a Yeoh modell képes a legpontosabban becsülni a megvizsgált gumitermék nyomásra adott válaszát összetett és nagy alakváltozás alatt. A gumiütközők vizsgálata során számolni kell a térfogatváltozással, amit a hiperelasztikus anyagmodelleket leíró energiafüggvényekben a térfogati rugalmassági modulussal lehet figyelembe venni. A térfogati rugalmassági modulus értékére érzékenységvizsgálatot végeztem és megállapítottam, hogy laboratóriumi mérésorozat nélkül 1000 [MPa] értékűre célszerű azt megválasztani, amennyiben az alakítás alatti fajlagos térfogatváltozás mértéke nem haladja meg a 0,13 [%]-ot. Ennek számítására eljárást dolgoztam ki.

Kutatásomat egy ipari igényeken és végeselemes szimuláción alapuló kétváltozós alakoptimalizálási feladat kidolgozásával folytattam. A célfüggvényt a kiinduló és optimális rugókarakterisztika közötti eltérésként határoztam meg, melynek elnyúló völgy alakú viselkedése kihívást jelentett az optimalizáló eljárásoknak. A szimulált hűtési (SA) algoritmust Matlab környezetben implementáltam adaptív keresési térrel és különböző hűtési függvényvel. A célfüggvény számításigényes hívása és az SA algoritmus sztochasztikus viselkedése miatt a kereső eljárás hiperparaméter-optimalizálási eljárását nem lehet közvetlenül a végeselemes modellen futtatva elvégezni. Ennek megoldására egy olyan új eljárást dolgoztam ki, melyben a szimulációt tartalmazó feladat helyett, a kisebb számításigénnyel hívható regressziós tartóvektor gép (SVR) helyettesítő modellt használtam az algoritmus tesztelésére és ezáltal a hiperparamétereinek feladatspecifikus adaptálására. Az SVR modell betanítására a 40 [db] mintával felvett maximin Latin Hiperkocka kísérlettervet és köbös kernel függvényt használtam. Az így betanított helyettesítő modell pontosan leírta a

gumitermék kétváltozós alakoptimalizálási feladatának bemenő és célértéke közötti kapcsolatot.

Az SA algoritmus működését és robusztusságát matematikai tesztfüggvények optimumának keresésével teszteltem. Az irodalmi és tapasztalati úton felvett diszkrét hiperparaméter értékek közül minden esetben feladat-specifikusan határoztam meg a legjobban teljesítő algoritmus beállítását. Az algoritmus által ismeretlen az optimum, azonban mind a matematikai tesztfüggvények, mind pedig az alakoptimalizálási feladat során képes volt annak egy kellően jó környezetét megtalálni, mely alátámasztja a kidolgozott algoritmus és annak konvergencia kritériumának helyes működését. A kereső eljárás képes műszaki szempontból elhanyagolható hibával megtalálni az optimális konstrukciót, így nem növelve tovább a nemlineáris anyagi viselkedésből és nagy alakváltozásból adódó modellezési hibákat.

A helyettesítő modellen elvégzett hiperparaméter-optimalizálási módszer minden lépése automatizálható, ezáltal mérnöki beavatkozás nélkül implementálható a szimuláció alapú tervezési folyamatokba. A kidolgozott eljárás a szimuláció alapú optimalizálási feladatokat időben tervezhetővé teszi. A beállított SA algoritmus költséghatékonyan és pontosan képes a globális optimum megközelítésére. A kezdeti hőmérséklet helyettesítő modellen történő meghatározása nagy pontosságú és jelentős időmegtakarítást jelent. A kidolgozott eljárás időszükséglete a szimulációs feladat bonyolultságától független, mindössze a helyettesítő modell számítási idejétől függ. A kidolgozott módszer a tervezhetőségével és rövidebb tervezési idejével növelheti a versenyképességet a piacon.

2. Új tudományos eredmények

2.1. Nyomó terhelésnek kitett gumiütköző viselkedésének numerikus modellezésére alkalmas hiperelasztikus anyagmodell

Vizsgálatot végeztem a választott gumitermék nyomó terhelés alatti működési karakterisztikájának leírására alkalmas hiperelasztikus anyagmodell kiválasztására. A lérugókban használt gumiütközők műszaki ellenőrzésekor az időfüggést nem veszik figyelembe, ezért a viszkózus és hiszterézis anyagi viselkedéseket, illetve a Mullins-hatást nem modelleztem.

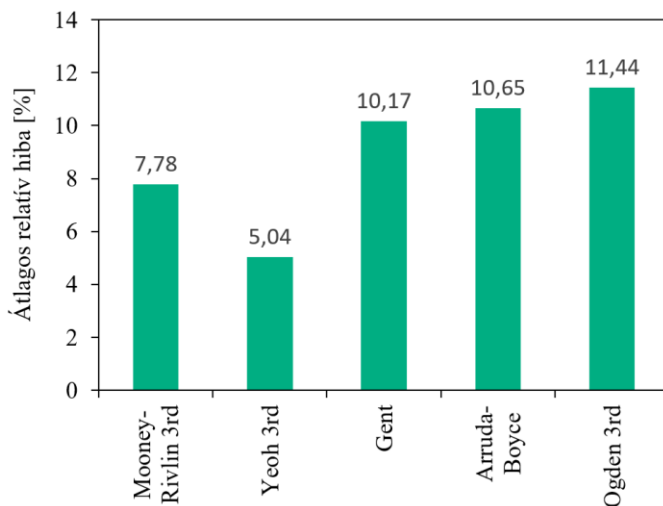
Ismertettem a nagy alakváltozások, továbbá a deformált anyagban tárolt energia leírására vonatkozó kontinuummechanikai háttért [1,2], melyek segítségével a gumik nagymértékű rugalmas alakváltozása a hiperelasztikus anyagmodellek [3] segítségével vizsgálható. A hiperelasztikus anyagmodellek egy része fenomenológiai, amelyek matematikai függvényekkel közelítik az anyagi választ. Ilyen fenomenológiai modell többek között a Mooney-Rivlin [4,5], a Yeoh [6], a Gent [7], az Arruda-Boyce [8] és az Ogden [9].

A termék gumikeverékének pontos összetétele ipari titok, keménysége az ISO 48-4 [S1] szabvány alapján 78 Shore A. A késztermékből gumi próbatesteket munkáltam ki az ISO 23529 [S2] alapján, melyeken laboratóriumi méréseket végeztem az ISO 7743 szabványban [S3] leírt 'A' módszer alapján. A méréssel meghatároztam a feszültség-fajlagos nyúlás karakterisztikát, melyre a hiperelasztikus anyagmodelleket (Mooney-Rivlin, Yeoh, Gent, Arruda-Boyce, Ogden) illesztettem.

Az anyagmodellek pontosságát először a gumi próbatestek egytengelyű nyomóvizsgálatának végeselemes szimulációjával ellenőriztem. A kapott eredmények alapján a Mooney-Rivlin és a Yeoh anyagmodellek 2,5 [%]-os átlagos relatív hiba alatt közelítették a gumi próbatest nyomó terhelésre adott anyagi viselkedését.

Az anyagmodellek pontosságát ezután a gumiütköző numerikus és laboratóriumi vizsgálatának összehasonlításával értékeltem ki. A vizsgált gumiütköző geometriája és peremfeltételei tengely-

szimmetrikusak, az alapanyag izotrop, ezért tengelyszimmetrikus elemet választottam a végeleselemes diszkretizációhoz. Az 1. ábrán látható szimulációs eredmények alapján a Yeoh anyagmodell átlagos relatív hibája 3 [%]-kal, míg a Mooney-Rivlin 7 [%]-kal romlott a nyomóvizsgálat végeleselemes futtatása során tapasztalt értékekhez képest. Ennek ellenére a Mooney-Rivlin és a Yeoh anyagmodellek jelentősen 10 [%] alatti hibával képesek becsülni az anyag választát inhomogén alakváltozási állapotra.



1. ábra. A anyagmodellek átlagos relatív hibája a gumitermék karakterisztikájához viszonyítva

Az eredmények alapján megállapítható, hogy ha csak a gumi próbatest nyomó igénybevételére rögzített mérési adatsor áll rendelkezésre az anyagmodell illesztéséhez, akkor a Yeoh modellt érdemes választani. A Yeoh anyagmodell képes a legpontosabban leírni a megvizsgált gumitermék nyomó terhelés alatti összetett alakváltozásának választát.

1. Tézis

A gumi Treloar-féle egy- és kéttengelyű húzó, valamint nyíró feszültség-fajlagos nyúlás karakterisztikáinak becslésére a Mooney-Rivlin, a Yeoh, a Gent, az Arruda-Boyce és az Ogden hiperelasztikus anyagmodellek alkalmasak. A vizsgálathoz szükséges idő jelentősen csökkenthető, amennyiben a gumi fő terhelésére kerül meghatározásra az anyagi viselkedés, ami gumiütközők esetén a nyomókarakterisztika. Az anyagmodellek pontosságát meghatároztam inhomogén alakváltozási állapotra, amihez egy adott keverékű, és összetett geometriával rendelkező gumiütköző kísérleti és numerikus vizsgálatát végeztem el. Megállapítottam, hogy a Yeoh hiperelasztikus anyagmodell képes a legpontosabban megbecsülni a gumiütköző nyomó terhelés alatti viselkedését.

Kapcsolódó publikáció

Huri, D.; Mankovits, T. Comparison of the Material Models in Rubber Finite Element Analysis. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2018, 393, 012018, doi:10.1088/1757-899X/393/1/012018.

2.2. A térfogati rugalmassági modulus értékének megválasztása gumiütközők numerikus vizsgálata esetén

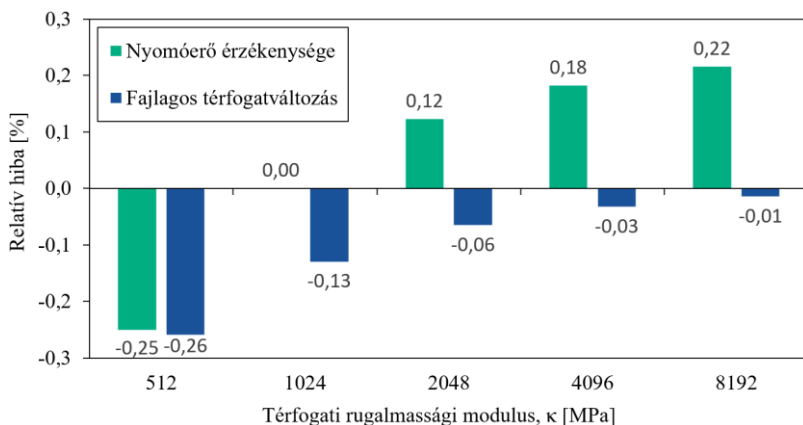
Általános esetben az összenyomhatatlanság alatt azt értjük, hogy az anyag térfogatváltozása nulla hidrosztatikai nyomás hatására, így a Poisson-tényező pontosan $\nu = 0,5$ [2,10]. A gumi vulkanizátumok a keverék adalékainak köszönhetően közel összenyomhatatlan viselkedést mutatnak, azaz a Poisson-tényező a $0,49 < \nu < 0,5$ tartományba esik [11].

Ismertettem az összenyomható hiperelasztikus anyagmodell térfogatváltozásból származó deformációs energiasűrűségének közelítését [12]. Ehhez szükséges a κ térfogati rugalmassági modulus pontos meghatározása, melyre nem áll rendelkezésre szabványos mérési módszer. Ezért megvizsgáltam, hogy lehetőség van-e κ értékére javaslatot tenni úgy, hogy az a vizsgált feladat szempontjából elhanyagolható hibát okozzon. A vizsgálathoz egy hengeres gumiütköző numerikus mintapéldáját dolgoztam ki, melyre alul és felül fémfegyverzet van vulkanizálva, amin keresztül nyomó terhelésnek van kitéve a magasság 50 [%]-áig.

Eljárást dolgoztam ki, melyben a diszkretizált numerikus modell csomópontjainak elmozdulásvektorait felhasználva a deformált test fajlagos térfogatváltozása számítható. A numerikus modell segítségével megállapítottam, hogy a fajlagos térfogatváltozás abszolút értéke 0,5 [%] alatti, ha $\kappa \geq 500$ [MPa].

A növekvő térfogatváltozással az összenyomható hiperelasztikus anyagmodell energiasűrűségét leíró függvény is érzékenyebb a κ értékének megválasztására.

Az összenyomáshoz szükséges terhelőerő érzékenységvizsgálatát a $\kappa = 2^i$ ($i = 5 \dots 13$) [MPa] értékekre végeztem el. A $\kappa = 1024$ [MPa] értékkel futtatott vizsgálat eredményeit referenciának választva, a 2. ábra mutatja a nyomóerő érzékenységét a κ megválasztására.



2. ábra. A $\kappa = 1024$ [MPa] értékkel futtatott vizsgálat eredményeit alapul véve a terhelőerő érzékenysége és a maximális alakváltozás alatti fajlagos térfogatváltozás értéke a térfogati rugalmassági modulus függvényében

2. Tézis

Az iparban alkalmazott gumiütközők vizsgálata során számolni kell a térfogatváltozással, amit a hiperelasztikus anyagmodelleket leíró energiatfüggvényekben a térfogati rugalmassági modulus (κ) lehet figyelembe venni. A κ értékére érzékenységvizsgálatot végeztem annak érdekében, hogy az anyagi viselkedést milyen mértékű hibával lehet leírni laboratóriumi mérésorozat nélkül. A gumiütközők végeselemes vizsgálata során javaslom 1000 [MPa] értékűre megválasztani a térfogati rugalmassági modulus, mivel ilyenkor a nyomóerőben ébredő hiba nagysága 0,25 [%]-tól kisebb a $500[\text{MPa}] \leq \kappa \leq 8000 [\text{MPa}]$ tartományban abban az esetben, amikor az alakítás alatti fajlagos térfogatváltozás mértéke nem haladja meg a 0,13 [%]-ot. Ennek számítására eljárást dolgoztam ki.

Kapcsolódó publikáció

Huri, D. Incompressibility and Mesh Sensitivity Analysis in Finite Element Simulation of Rubbers. Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 2016, 7, 7–12, doi:10.1556/1848.2016.7.1.2.

2.3. Helyettesítő modellek használata gumiütköző kétváltozós alakoptimalizálási feladata esetén

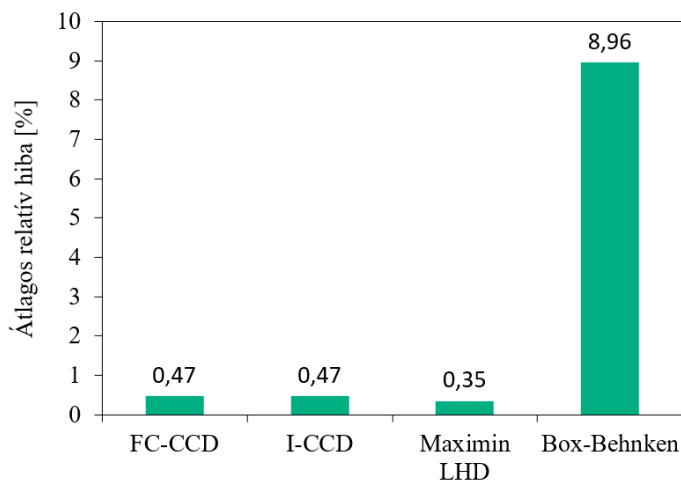
Végeselemes szimuláción alapuló kétváltozós alakoptimalizálási feladatot dolgoztam ki melyen a kereső algoritmusok tesztelhetőek. A célfüggvényt a kiinduló és optimális rugókarakterisztika közötti eltérésként határoztam meg, melynek elnyúló völgy alakú viselkedése kihívás az optimalizáló eljárásoknak.

A vizsgált numerikus szimuláció alapú alakoptimalizálási feladat hívása költséges, azonban a célfüggvény közelíthető helyettesítő modellel, mely pontossága nagymértékben függ a mintavételezett pontok számától és tervezési téren belüli eloszlásuktól. A gumi nemlineáris tulajdonsága miatt legalább háromszintű mintavételezés szükséges a tervezési változók mentén [13]. Ezért összehasonlítottam a Box-Behnken [14], középpontos kompozíciós (FC-CCD és I-CCD) [15] és a maximin LHD [16] tervre betanított helyettesítő modellek optimum becslését.

A 3. ábra alapján az átlagos relatív hiba 0,5 [%] alatti a kilenc mintát vételező FC-CCD, I-CCD és Maximin LHD tervre betanított helyettesítő modelleket használva. A maximin Latin Hiperkocka kísérlettervre illesztett válaszfelület becslési pontossága azonos számú minta vételezése mellett nagyságrendben megegyezik a vizsgált középpontos kompozíciós tervekkel. A gumitermékek kétváltozós alakoptimalizálási feladatának helyettesítő modellezésére legalább 9 [db] mintával a maximin LHD tervet javaslom. Ennek előnye, hogy a mintavételezés száma és ezáltal a helyettesítő modell becslési pontossága is tovább növelhető.

Javaslatot tettem a regressziós tartóvektor gép (SVR) [17,18] betanításához 13,27,40,54 [db] mintakészletet vizsgálva. Mivel a tanító adathalmaz kis méretű, a többször megismételt keresztkiértékelési (*10-fold*) eljárással [19] elvégeztem az SVR modellek betanítását. A modelleket tesztelő adathalmazon futtattam majd az átlagos négyzetes hiba négyzetgyökével (RMSE) határoztam meg pontosságukat. A számított RMSE értékek alapján a 40 [db] mintával felvett maximin Latin Hiperkocka kísérlettervet és köbös

kernel függvényt javaslom az SVR modell betanítására. Az így betanított helyettesítő modell pontosan leírta a gumitermék kétváltozós alakoptimalizálási feladatának bemenő és célértéke közötti kapcsolatot.



3. ábra. A különböző kísérlettervezéssel végzett válaszfelület optimalizációval becsült konstrukciók nyomóerőinek átlagos relatív hibája az elvárthoz képest.

3. Tézis

A gumiütközők kétváltozós alakoptimalizálási feladatához regressziós tartóvektor gép (SVR) alapú eljárást dolgoztam ki. A felügyelt gépi tanítás mintavételezési stratégiájának helyes megválasztása érdekében a problémát jellemző nemlineáris hatások kimutatására alkalmas kísérletterveket (Box-Behnken, lapközepes- és forgatható középpontos kompozíciós, maximin Latin Hiperkocka) hasonlítottam össze. Az összehasonlító vizsgálat eredményére alapozva a maximin Latin Hiperkocka tervvel meghatároztam a feladatot jól közelítő SVR modellhez szükséges tanulópontok számát. Az így betanított SVR modell pontos és hatékony megoldás a gumiütköző kétváltozós alakoptimalizálási célfüggvényének helyettesítésére.

Kapcsolódó publikáció

Huri, D.; Mankovits, T. Surrogate Model-Based Parameter Tuning of Simulated Annealing Algorithm for the Shape Optimization of Automotive Rubber Bumpers. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5451, doi:10.3390/app12115451. (Q2, IF: 2,838 (2021))

Huri, D.; Mankovits, T. Automotive Rubber Product Design Using Response Surface Method. *Period. Polytech. Transp. Eng.* 2022, 50, 28–38, doi:10.3311/PPtr.16280. (Q2, (2021))

Huri, D.; Mankovits, T. Parameter Selection of Local Search Algorithm for Design Optimization of Automotive Rubber Bumper. *Appl. Sci.* 2020, 10, 3584, doi:10.3390/app10103584. (Q2, IF: 2,679)

Huri, D.; Mankovits, T. Automotive Rubber Part Design Using Machine Learning. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 659, 012022, doi:10.1088/1757-899X/659/1/012022.

2.4. Szimulált hűtési algoritmus fejlesztése gumiütköző alakoptimalizálási feladatára, feladatspecifikus hiperparaméter-optimalizálási eljárás kidolgozása

Szimulált hűtési (SA) [20] algoritmust fejlesztettem adaptív keresési térrel és különböző hűtési függvényrel, mely működését az 1. algoritmus mutatja. A pszeudokód négy fő lépésre bontható, a Metropolis kritériumon [21] alapú elfogadási függvényre, az új állapot generálására, a hűtési stratégiára és a leállási/konvergencia feltételre. Az utóbbi három lépésre számos eljárást ismert, melyek kombinálásával az alábbi algoritmust dolgoztam ki:

- Az új állapot generálására a Schwefel 1/5-ös sikerszabályán [22] alapuló adaptív keresési tért használtam, ahol a lépésméret adaptáló tényezőt változónak vettem fel.
- Az algoritmus futásidejét és a globális optimum környezetének megtalálását leginkább a hűtési stratégia befolyásolja. Ezért különböző hűtési függvényt (exponenciális-szorzat [20], lineáris [23], gyors hűtési eljárás [24]) és hűtési paramétert vizsgáltam.
- A kiinduló hőmérsékletet az Aarts és Van Leerhoven [25] által ismertett analitikus képlet segítségével határoztam meg.

- (1) (Inicializálás)
Megadunk egy kiinduló tervezési változót $\mathbf{d}_0 \in \Omega$; kiinduló hőmérsékletet T_0 , T_t hőmérséklet paraméteren elvégzett N próbálkozást; $\Lambda(t)$ hűtési függvényt; $\boldsymbol{\rho}_0$ kiinduló keresési tért; β lépésméret adaptáló tényezőt; a $(m_c; \boldsymbol{\varepsilon} = (\boldsymbol{\varepsilon}_d, \boldsymbol{\varepsilon}_E))$ konvergencia feltétel paramétereit
Legyen a számláló a célfüggvény hívásra $m = 0$, az elfogadott állapotra $k = 0$; a hűtési lépcsőre $t = 1$
Legyen a változók értéke $\mathbf{d}_k = \mathbf{d}_0$; $\mathbf{d}_{opt} = \mathbf{d}_0$; $\boldsymbol{\rho}_t = \boldsymbol{\rho}_0$; $T = T_0$
- (2) (Új állapot generálása)
do
 generáljunk egy véletlen lépést $\mathbf{a}_m(\boldsymbol{\rho}_t) \in \mathbb{R}^n$; $\mathbf{d}_{m+1} = \mathbf{d}_k + \mathbf{a}_m$
while $\mathbf{d}_{m+1} \in \Omega$
 $\mathbf{d}_{new} = \mathbf{d}_{m+1}$; $(m = m + 1)$
- (3) (Metropolisz Kritérium)
számítsuk ki $\Delta E = E(\mathbf{d}_{new}) - E(\mathbf{d}_k)$
if $\Delta E < 0$
 $\mathbf{d}_{k+1} = \mathbf{d}_{new}$; $(k = k + 1)$
 if $\mathbf{d}_{new} < \mathbf{d}_{opt}$, $\mathbf{d}_{opt} = \mathbf{d}_{new}$
else
 generáljunk egy egyenletes eloszlású véletlenszámot (r) a $(0; 1)$ tartományban
 if $r < P = \exp(-\Delta E/T_t)$; $\mathbf{d}_{k+1} = \mathbf{d}_{new}$, $(k = k + 1)$
end
- (4) (Hőmérséklet paraméter hűtése, keresési tér adaptálása)
if $m \% N = 0$
 $T_t \rightarrow T_{t+1}$, hívjuk meg a hűtési függvényt $\Lambda(t)$
 kiszámoljuk az χ_{10N} -t, ezután adaptáljuk a keresési tért $\boldsymbol{\rho}_t \rightarrow \boldsymbol{\rho}_{t+1}$; $(t = t + 1)$
end
- (5) (Konvergencia feltétel)
if $m > m_c$
 if $C(cc_1, cc_2, sc) = 1$, ellenőrizzük a leállási/konvergencia feltételt
 állítsuk meg a keresést és adjuk vissza \mathbf{d}_{opt} , $E(\mathbf{d}_{opt})$, m
 else
 lépjünk vissza a (2)-es lépésre
 end
end
-

Hiperparaméter-optimalizálási eljárást fejlesztettem, mely figyelembe veszi az algoritmus pontosságát és a konvergenciához szükséges függvényhívások számát. A fejlesztett SA algoritmus és hiperparaméter-optimalizáló eljárás tesztelését matematikai tesztfüggvényeken [26] végeztem el. A *Rosenbrock*, *Six-hump camel*, *McCormick* és *Michalewicz* függvényeket a gumiütközők alakoptimalizálási feladatára felírt célfüggvény viselkedése (elnyúló völgy és/vagy több lokális minimum) alapján választottam.

Az eredmények alapján a fejlesztett SA algoritmus a vizsgált matematikai tesztfüggvények esetén alkalmas a globális optimum egy kellően jó környezetének megtalálására, ezzel bizonyítva a fejlesztett hiperparaméter-optimalizálási eljárás robusztusságát.

4. Tézis

Gumiütköző alakoptimalizálására feladatspecifikus, adaptív keresési teret és különböző hűtési függvényt alkalmazó szimulált hűtési algoritmust fejlesztettem ki. Az algoritmus változó hiperparamétereire optimalizálási eljárást dolgoztam ki és matematikai tesztfüggvényeket (Rosenbrock, Six-hump camel, McCormick, Michalewicz) vizsgáltam a megfelelő működés ellenőrzésére. A tesztfüggvényekkel igazoltam, hogy a hiperparaméter-optimalizálással beállított szimulált hűtési algoritmus robusztus és alkalmas a globális optimum egy kellően jó környezetének meghatározására gumiütközők alakoptimalizálási feladatában.

Kapcsolódó publikáció

Huri, D.; Mankovits, T. Surrogate Model-Based Parameter Tuning of Simulated Annealing Algorithm for the Shape Optimization of Automotive Rubber Bumpers. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5451, doi:10.3390/app12115451. (Q2, IF: 2,838 (2021))

2.5. Optimalizáló algoritmus hiperparamétereinek helyettesítő modell alapú adaptálása numerikus szimuláción alapuló feladatokra

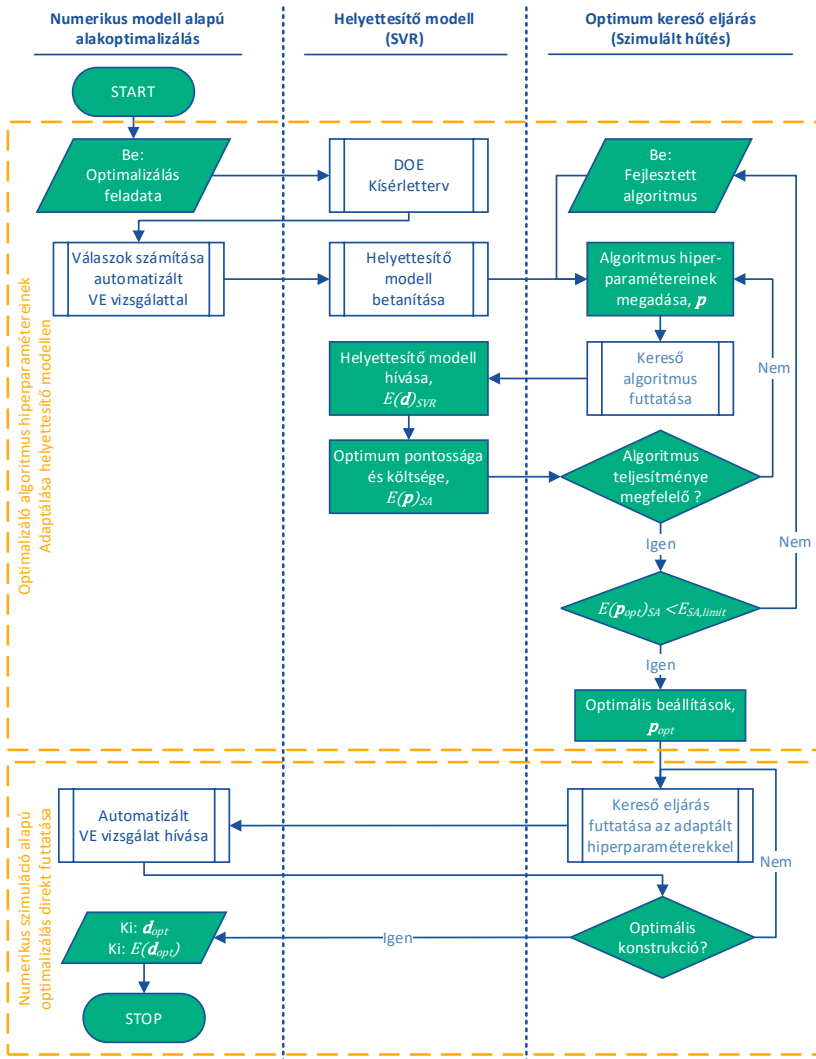
Célom egy olyan új eljárás fejlesztése volt, mely alkalmas a szimulált hűtés hiperparamétereinek adaptálására a mérnöki gyakorlatban előforduló számításigényes szimuláció alapú optimalizálási feladatokra. Ezért a szimulációt tartalmazó feladat helyett a kisebb számításigénnyel hívható helyettesítő modellt alkalmazva végeztem el az algoritmus tesztelését és adaptálását.

A fejlesztett eljárás kivitelezése három részre osztható a 4. ábra alapján, melyek közül az első a numerikus feladat automatizálása volt. A végeleges modell elő- és utófeldolgozását Femap API-n keresztül utasított parancsok formájában saját program készítésével hajtottam végre. A folyamatba való integrálhatóság miatt kétirányú kommunikációt alakítottam ki egy külső szoftverrel (Matlab).

A szimuláció alapú célfüggvény helyettesítésére egy az optimalizálási feladat változóinak számától és a fizikai probléma viselkedésének összetettségétől függetlenül alkalmazható gépi tanuló módszert választottam. A kiválasztott SVR modellt a 40 [db] mintával felvett maximin Latin Hiperkocka kísérlettervre tanítottam be.

A folyamat központi részeként futtattam a fejlesztett hiperparaméter-optimalizálási eljárást. Így beállítottam a szimulált hűtési algoritmus hiperparamétereit az SVR helyettesítő modell optimumának keresési feladatát vizsgálva.

A meghatározott hiperparaméterekkel a szimulált hűtési algoritmust közvetlenül futtattam a szimulációt tartalmazó célfüggvényen, amelynek ismert optimumát kellően jól megközelítette. Az algoritmus beállítása az SVR modellen nagyságrendekkel kevesebb időt igényelt, mint a szimuláció direkt futtatásával. Az eljárás előnye, hogy az optimalizálási folyamatot időben tervezhetővé teszi az algoritmus konvergenciájához szükséges függvényhívások becslésével. A helyettesítő modellen elvégzett hiperparaméter-optimalizálási módszer automatizálható, ezáltal integrálható a szimuláció alapú tervezési folyamatokba.



4. ábra A szimuláció alapú optimalizálási feladat kereső algoritmusának helyettesítő modell alapú hiperparaméter adaptálása

5. Tézis

A szimulált hűtési algoritmus hiperparamétereinek beállítása annak sztochasztikus működése miatt nem valósítható meg a szimuláció alapú optimalizálási feladat közvetlen hívásával. Ennek érdekében az algoritmus tesztelésére és hiperparamétereinek feladatspecifikus adaptálására helyettesítő modellt alkalmazó eljárást dolgoztam ki. Az eljárás a gumiütköző alakoptimalizálási feladatát nagy pontossággal, magas automatizáltsági fokkal és időben tervezhető módon képes megoldani, amely támogatja annak termékfejlesztési folyamatba történő integrálhatóságát.

Kapcsolódó publikáció

Huri, D.; Mankovits, T. Surrogate Model-Based Parameter Tuning of Simulated Annealing Algorithm for the Shape Optimization of Automotive Rubber Bumpers. Appl. Sci. 2022, 12, 5451, doi:10.3390/app12115451. (Q2, IF: 2,838 (2021))

Huri, D.; Mankovits, T. Parameter Selection of Local Search Algorithm for Design Optimization of Automotive Rubber Bumper. Appl. Sci. 2020, 10, 3584, doi:10.3390/app10103584. (Q2, IF: 2,679)

Jövőbeni kutatási lehetőségek

Az optimalizáló algoritmus hiperparamétereinek helyettesítő modell alapú adaptálására kidolgozott eljárás számos új jövőbeni kutatást vet fel. Egyik lehetőség a nagy változó számú optimalizációs feladatok vizsgálata, melyre az SVR helyettesítő modell és SA algoritmus hatékony eljárás lehet. Az ismertetett folyamatban tetszőleges helyettesítő modell és optimum kereső eljárás alkalmazható, ezáltal lehetőség van újabb gépi tanuló módszereket alkalmazni és azok teljesítményét összevetni. A helyettesítő modellen különböző globális optimum kereső eljárások betanítását elvégezve a feladatra legjobban használható algoritmust lehetne megállapítani. A numerikus szimuláción alapuló feladatokon túl egyéb a gépészetben gyakran előforduló számításiigényes modell alapú tervezési eljárások optimalizálási feladatának megoldására is javasolt az ismertetett módszer használata.

Irodalomjegyzék

1. Bonet, J.; Wood, R.D. *Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis*; 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, 2008; ISBN 978-0-511-39468-3.
2. Kozák, I. *Kontinuummechanika*; Miskolci Egyetemi Kiadó: Miskolc, 1995;
3. Bergström, J. *Mechanics of Solid Polymers*; Elsevier, 2015; ISBN 9780323311502.
4. Rivlin, R.S. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials. I. Fundamental Concepts. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Math. Phys. Sci.* **1948**, *240*, 459–490, doi:10.1098/rsta.1948.0002.
5. Mooney, M. A Theory of Large Elastic Deformation. *J. Appl. Phys.* **1940**, *11*, 582–592, doi:10.1063/1.1712836.
6. Yeoh, O.H. Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1993**, *66*, 754–771, doi:10.5254/1.3538343.
7. Gent, A.N. A New Constitutive Relation for Rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1996**, *69*, 59–61, doi:10.5254/1.3538357.
8. Arruda, E.M.; Boyce, M.C. A Three-Dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials. *J. Mech. Phys. Solids* **1993**, *41*, 389–412, doi:10.1016/0022-5096(93)90013-6.
9. Ogden, R.W.; A, P.R.S.L. Large Deformation Isotropic Elasticity – on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids. *Proc. R. Soc. London. A. Math. Phys. Sci.* **1972**, *326*, 565–584, doi:10.1098/rspa.1972.0026.
10. Holzapfel, G.A. *Nonlinear Solid Mechanics, A Continuum Approach for Engineering*; John Wiley and Sons Ltd: Chichester, 2000; ISBN 047182304X.
11. Mankovits, T. Gumialkatrészek Alakoptimalizálása, University of Miskolc, 2012.
12. Horgan, C.O.; Murphy, J.G. On the Volumetric Part of Strain-Energy Functions Used in the Constitutive Modeling of Slightly Compressible Solid Rubbers. *Int. J. Solids Struct.* **2009**, *46*, 3078–3085,

doi:10.1016/j.ijsostr.2009.04.007.

13. Erdősné Sélley, C.; Gyurecz, G.; Janik, J.; Körtélyesi, G. *Mérnöki Optimalizáció*; Körtélyesi, G., Ed.; Typotex Kiadó: Budapest, HU, 2012; ISBN 9789632795386.
14. Box, G.E.P.; Behnken, D.W. Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables. *Technometrics* **1960**, *2*, 455–475, doi:10.2307/1266454.
15. Box, G.E.P.; Wilson, K.B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *J. R. Stat. Soc. Ser. B* **1951**, *13*, 1–45.
16. Morris, M.D.; Mitchell, T.J. Exploratory Designs for Computational Experiments. *J. Stat. Plan. Inference* **1995**, *43*, 381–402, doi:10.1016/0378-3758(94)00035-T.
17. Cortes, C.; Vapnik, V. Support-Vector Networks. *Mach. Learn.* **1995**, *20*, 273–297, doi:10.1007/BF00994018.
18. Drucker, H.; Burges, C.J.C.; Kaufman, L.; Smola, A.; Vapnik, V. Support Vector Regression Machines. In Proceedings of the Advances in neural information processing systems; MIT Press: Cambridge, 1997; pp. 155–161.
19. Kohavi, R. A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection. In Proceedings of the Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2; Morgan Kaufmann Publishers Inc.: Montreal, Quebec, Canada, 1995; pp. 1137–1145.
20. Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.D.; Vecchi, M.P. Optimization by Simulated Annealing. *Science* (80-.). **1983**, *220*, 671–680, doi:10.1126/science.220.4598.671.
21. Metropolis, N.; Rosenbluth, A.W.; Rosenbluth, M.N.; Teller, A.H.; Teller, E. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *J. Chem. Phys.* **1953**, *21*, 1087–1092, doi:10.1063/1.1699114.
22. Schwefel, H.-P. *Evolution and Optimum Seeking*; Wiley-Interscience, Ed.; 1st ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, 1995; ISBN 978-0471571483.
23. Randelman, R.E.; Grest, G.S. N-City Traveling Salesman Problem: Optimization by Simulated Annealings. *J. Stat. Phys.* **1986**, *45*, 885–

890, doi:10.1007/BF01020579.

24. Szu, H. Fast Simulated Annealing. In Proceedings of the AIP Conference Proceedings; AIP, 1986; Vol. 151, pp. 420–425.
25. Aarts, E.H.L.; van Laarhoven, P.J.M. Statistical Cooling: A General Approach To Combinatorial Optimization Problems. *Philips J. Res.* **1985**, *40*, 193–226.
26. Surjanovic, S.; Bingham, D. Optimization Test Functions and Datasets Available online: <https://www.sfu.ca/~ssurjano/optimization.html> (accessed on 8 January 2022).

Szabványok

- S1. ISO 48-4:2018, Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of hardness – Part 4: Indentation hardness by durometer method (Shore hardness), <https://www.iso.org/standard/74969.html>
- S2. ISO 23529:2016, Rubber – General procedures for preparing and conditioning test pieces for physical test methods, <https://www.iso.org/standard/70323.html>
- S3. ISO 7743:2017, Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of compression stress-strain properties, <https://www.iso.org/standard/72784.html>

Publikációs jegyzék

Referált folyóiratcikkek

- P1. Huri, D.; Mankovits, T. Surrogate Model-Based Parameter Tuning of Simulated Annealing Algorithm for the Shape Optimization of Automotive Rubber Bumpers. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5451, doi:10.3390/app12115451. (Q2, IF: 2,838 (2021))
- P2. Huri, D.; Mankovits, T. Automotive Rubber Product Design Using Response Surface Method. *Period. Polytech. Transp. Eng.* 2022, 50, 28–38, doi:10.3311/PPtr.16280. (Q2, (2021))
- P3. Huri, D.; Mankovits, T. Parameter Selection of Local Search Algorithm for Design Optimization of Automotive Rubber Bumper. *Appl. Sci.* 2020, 10, 3584, doi:10.3390/app10103584. (Q2, IF: 2,679)
- P4. Huri, D.; Mankovits, T. Automotive Rubber Part Design Using Machine Learning. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 659, 012022, doi:10.1088/1757-899X/659/1/012022.
- P5. Huri, D.; Mankovits, T. Comparison of the Material Models in Rubber Finite Element Analysis. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018, 393, 012018, doi:10.1088/1757-899X/393/1/012018.
- P6. Huri, D. Incompressibility and Mesh Sensitivity Analysis in Finite Element Simulation of Rubbers. *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.* 2016, 7, 7–12, doi:10.1556/1848.2016.7.1.2.

Lektorált folyóiratcikkek

- P7. Huri, D. Optimáló Módszerek Alkalmazhatósága Járműipari Gumitermékek Tervezésében. *Int. J. Eng. Manag. Sci. / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények* 2020, 5, 358–363, doi:10.21791/IJEMS.2020.2.41.
- P8. Huri, D. Finite Element Software for Rubber Products Design. *Int. J. Eng. Manag. Sci. / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények* 2018, 3, 13–20, doi:10.21791/IJEMS.2018.1.2.
- P9. Mankovits, T.; Huri, D.; Imre, K.; Kocsis, I.T.; Szabó, T. Material Characterization and Numerical Simulation of a Rubber Bumper. *Int. J. Mech. Aerosp. Ind. Mechatron. Manuf. Eng.* 2014, 8, 1367–1370.

- P10. Jacsó, N.; Mankovits, T.; Kállai, I.; Huri, D.; Kocsis, I.T.; Balogh, G. Gumi Próbatétel Laboratóriumi Mérése És Kiértékelése Nyomó Igénybevételre. Debreceni Műszaki Közlemények 2013, 1, 89–97.

Konferenciakötetben megjelent cikkek

- P11. Huri, D. Hiperelasztikus Anyagmodellek Illesztése Gumi Anyagra = Fitting Different Hyperelastic Material Model for Rubber Material. In Proceedings of the XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019; 2019; pp. 213–216.
- P12. Huri, D.; Mankovits, T. Comparison of the Material Models in Rubber Finite Element Analysis. In Proceedings of the The 10th International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering; 2018; pp. 42–43.
- P13. Huri, D.; Mankovits, T. Comparison of the Hyperelastic Material Models in the Finite Element Investigations of Rubber Parts. Proc. 6th Int. Sci. Conf. Adv. Mech. Eng. (ISCAME 2018) 2018, 75–76.
- P14. Huri, D. Gumipróbatétel Egytengelyű Nyomóvizsgálata. In Proceedings of the OGÉT 2018: XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: 26th International Conference on Mechanical Engineering.; 2018; pp. 208–211.
- P15. Huri, D. Locking Jelenség Vizsgálata Hiperelasztikus Anyagok Végelem Szimulációjában = Locking Effect Analysis in Finite Element Simulation of Hyperelastic Materials. In Proceedings of the OGÉT 2017: XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia; 2017; pp. 199–202.
- P16. Huri, D.; Mankovits, T. Incompressibility Analysis of Rubbers Using FEM. In Proceedings of the Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016); 2016; pp. 247–253.
- P17. Huri, D.; Mankovits, T.; Kállai, I. Izoparametrikus Végelemek Bezáródásának Vizsgálata Nagy Alakváltozás Esetén = Numerical Investigations on the Locking Effect of Axi-Symmetric Isoparametric Finite Elements. In Proceedings of the Proceedings of the 1st international scientific conference on advances in mechanical engineering (ISCAME 2013): 10-11 October 2013, Debrecen, Hungary; 2013; pp. 70–73.

- P18. Huri, D.; Mankovits, T. Hiperelasztikus Anyagmodellek Kontinuum-Mechanikai Háttére, Optimalizálási Lehetőség Mooney–Rivlin Anyagállandókra. In Proceedings of the Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban, 2012; 2012; pp. 613–622.
- P19. Huri, D.; Mankovits, T.; Portik, T. Gumyszerű Anyagok Végeszelelem Vizsgálatának Lehetőségei a FEMAP 9.3 Alkalmazásával = Possibilities of Finite Element Analysis with Hyperelastic Material Models Using FEMAP 9.3. In Proceedings of the Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi régióban 2011; 2011; pp. 531–538.

További konferencia-előadás

- P20. Huri, D.; Mankovits, T. Stochastic Search Algorithm for Design Optimization of Automotive Rubber Parts. In Proceedings of the The 11th International Conference on Applied Informatics; Eger, 2020.



Nyilvántartási szám: DEENK/497/2022.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Huri Dávid

Doktori Iskola: Informatikai Tudományok Doktori Iskola

MTMT azonosító: 10044564

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

1. **Huri, D.**: Optimaló módszerek alkalmazhatósága járműipari gumitermékek tervezésében.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 5 (2), 358-363, 2020. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2020.2.41>.
2. Jacsó, N., Mankovits, T., Kállai, I., **Huri, D.**, Kocsis, I., Balogh, G.: Gumi próbatest laboratóriumi mérése és kiértékelése nyomó igénybevételre = Laboratory measurements and evaluation of rubber test piece for compression.
Debreceni műszaki közl. 12 (1), 89-97, 2013. ISSN: 1587-9801.

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (3)

3. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Automotive Rubber Product Design Using Response Surface Method.
Per. Polytech. Transport. Eng. 50 (1), 28-38, 2022. ISSN: 0303-7800.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3311/PPtr.16280>
4. **Huri, D.**: Finite Element Software for Rubber Products Design.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 3 (1), 13-20, 2018. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.1.2>.
5. **Huri, D.**: Incompressibility and mesh sensitivity analysis in finite element simulation of rubbers.
Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 7 (1), 7-12, 2016. ISSN: 2062-0810.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/1848.2016.7.1.2>

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

6. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Surrogate Model-Based Parameter Tuning of Simulated Annealing Algorithm for the Shape Optimization of Automotive Rubber Bumpers.
Appl. Sci.-Basel. 12 (11), 1-22, 2022. EISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app12115451>
IF: 2.838 (2021)





7. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Parameter Selection of Local Search Algorithm for Design Optimization of Automotive Rubber Bumper.
Appl. Sci.-Basel. 10 (10), 1-16, 2020. EISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app10103584>
IF: 2.679
8. Mankovits, T., **Huri, D.**, Kállai, I., Kocsis, I., Szabó, T.: Material Characterization and Numerical Simulation of a Rubber Bumper.
Int. J. Mech. Aerospace Ind. Mechatron. Manufact. Engineer. 8 (8), 1367-1370, 2014. ISSN: 1307-6892.

Magyar nyelvű konferencia közlemények (6)

9. **Huri, D.**: Hiperelasztikus anyagmodellek illesztése gumi anyagra = Fitting Different Hyperelastic Material Model for Rubber Material.
In: XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019. Szerk.: Barabás István, Erdélyi Magyar Tudományos Társaság, Nagyvárad, 213-216, 2019.
10. **Huri, D.**: Gumipróbatest egytengelyű nyomóvizsgálata.
In: 26. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: OGÉT 2018. Szerk.: Csibi Vencel, Barabás István, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), Kolozsvár, 208-211, 2018, (ISSN 2068-1267)
11. **Huri, D.**: Locking jelenség vizsgálata hiperelasztikus anyagok végeelem szimulációjában = Locking Effect Analysis in Finite Element Simulation of Hyperelastic Materials.
In: OGÉT 2017: XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: 25th International Conference on Mechanical Engineering. Szerk.: Csibi Vencel-József, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), Kolozsvár, 199-202, 2017.
12. **Huri, D.**, Mankovits, T., Kállai, I.: Izoparametrikus végeelemek bezáródásának vizsgálata nagy alakváltozás esetén = Numerical investigations on the locking effect of axi-symmetric isoparametric finite elements.
In: Proceedings of the 1st international scientific conference on advances in mechanical engineering (ISCAME 2013) : 10-11 October 2013, Debrecen, Hungary. Szerk.: Mankovits Tamás, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, 70-73, 2013. ISBN: 9789634736233
13. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Hiperelasztikus anyagmodellek kontinuum-mechanikai háttere, optimalizálási lehetőség Mooney-Rivlin anyagállandókra = Continuum mechanics background of hyperelastic material models, optimization possibility of Mooney-Rivlin's material permanents.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2012 : konferencia előadásai : Szolnok, 2012. május 10.. Szerk.: Pokorádi László, Debreceni Egyetem, Debrecen, 613-621, 2012. ISBN: 9789637064289





14. **Huri, D.**, Mankovits, T., Portik, T.: Gumiszzerű anyagok végeeselemes vizsgálatának lehetőségei a FEMAP 9.3 alkalmazásával = Possibilities of finite element analysis with hyperelastic material models using FEMAP 9.3.

In: Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2011 : konferencia előadásai : Miskolc Egyetemváros, 2011. május 18.. Szerk.: Pokorádi László, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 531-538, 2011. ISBN: 9789637064258

Idegen nyelvű konferencia közlemények (3)

15. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Automotive rubber part design using machine learning.
IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 659, 1-6, 2019. ISSN: 1757-8981.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012022>
16. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Comparison of the material models in rubber finite element analysis.
IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 393, 1-7, 2018. ISSN: 1757-8981.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012018>
17. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Incompressibility analysis of rubbers using FEM.
In: Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 247-253, 2016. ISBN: 9789634739449

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (1)

18. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Comparison of the hyperelastic material models in the finite element investigations of rubber parts.
In: Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018) : Book of extended abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 75-76, 2018. ISBN: 9789634900511





További közlemények

Magyar nyelvű könyvek (2)

19. Mankovits, T., **Huri, D.**: Modellezés és szimuláció: a lineáris rugalmasságtan és a végeelem-módszer. Debreceni Egyetem, Debrecen, 183 p., 2015. ISBN: 9789634738978
20. Szíki, G. Á., Mankovits, T., Hajdu, S., Deák, K., **Huri, D.**: Műszaki mechanika példatár. Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 239 p., 2015. ISBN: 9789634739098

Idegen nyelvű, külföldi könyvrészletek (1)

21. Rashwan, A., **Huri, D.**, Mankovits, T.: Numerical Investigation of 3D Lattice Infill Pattern Cellular Structure for Orthopedic Implant Design.
In: KOD 2021: International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering. Eds.: Cavic Maja, Mitrovic Radivoje, Rackov Milan, Springer International Publishing Ag, Berlin, 467-472, 2022, (Mechanisms and Machine Science, ISSN 2211-0984 ; 109.) ISBN: 9783030884659

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

22. File, M., Mankovits, T., **Huri, D.**: Optical Investigation of the Limits of Modeling the Nonlinear Elastic Behavior of PA6 Using Linear Elastic Material Models.
Appl. Sci.-Basel. 12 (3), 1-16, 2022. ISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app12031057>
IF: 2.838 (2021)
23. Vámosi, A., Mankovits, T., **Huri, D.**, Kocsis, I., Szabó, T.: Comparison of Different Data Acquisition Techniques for Shape Optimization Problems.
Int. J. Mech. Aerospace Ind. Mechatron. Manufact. Engineer. 9 (3), 346-349, 2015. ISSN: 1307-6892.

Magyar nyelvű konferencia közlemények (3)

24. File, M., **Huri, D.**, Mankovits, T.: Lineárisan rugalmas anyagmodell pontosságának vizsgálata poliamid modellezésekor optikai mérőrendszer segítségével = Investigating the accuracy of the linear elastic material models when modelling PA6 using an optical measurement system
In: XXX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia - OGÉT 2022, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), Kolozsvár, 128-131, 2022, (ISSN 2668-9685)
25. **Huri, D.**, Fazekas, L., Balogh, G.: Lemorzsolódó hallgatók a gépészmérnöki alapszakon, részismereti tudás beszámítása az OKJ képzésbe.
In: Műszaki tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2015 : konferencia előadásai : Debrecen, 2015. június 11.. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 412-417, 2015. ISBN: 9789637064326





26. Kállai, I., Major, Z., Czél, G., Mankovits, T., **Huri, D.**: Alakváltozási sebesség és geometriai tényezők hatása uhmwpe szilárdsági tulajdonságaira = The effect of load rate and geometrical factors on the mechanical properties of uhmwpe.
In: Proceedings of the 1st international scientific conference on advances in mechanical engineering (ISCAME 2013) : 10-11 October 2013, Debrecen, Hungary.. Szerk.: Mankovits Tamás, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, 79-84, 2013. ISBN: 9789634736233

Idegen nyelvű konferencia közlemények (3)

27. File, M., Kállai, I., **Huri, D.**, Mankovits, T.: Optical Investigation of the Strain Distribution with Different Orientations on Aerospace Composite Material.
Lect. Notes Mech. Eng. 2023, 549-557, 2023. ISSN: 2195-4356.
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_45
28. File, M., Cseke, R., **Huri, D.**, Balogh, G., Mankovits, T.: Finite element analysis of closed-cell aluminum foam approximated with Weaire-Phelan unit cell structure.
IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 1246, 1-7, 2022. ISSN: 1757-8981.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012002>
29. Mankovits, T., Vámosi, A., Kocsis, I., **Huri, D.**, Kállai, I., Szabó, T.: Shape design of axially symmetric rubber part using finite element method and support vector machines.
In: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2015). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 114-119, 2015. ISBN: 9789634739173

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (3)

30. Al, J. M., **Huri, D.**: Fundamental considerations for finite element modeling of a polyurethane foam jounce.
In: 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2019) 7-9 November, 2019 Debrecen, Hungary : Conference Proceedings : Book of Extended Abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 3-4, 2019. ISBN: 9789634901686
31. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Comparison of the material models in rubber finite element analysis.
In: Book of Abstract : The 10th International Conference [on] Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, KOD 2018, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, 42-43, 2018. ISBN: 9788660220594





32. Mankovits, T., Kocsis, I., Szabó, T., Vámosi, A., **Huri, D.**: SVR and FEA Based Shape Optimization on Air Spring Bumpers.

In: Book of Abstracts of the 4th International Conference on Engineering Optimization. Ed.: H. C. Rodrigues, J. Herskovits, C. M. Mota Soares, J. M. Guedes, A. L. Araújo, J. O. Folgado, F. Moleiro, J. F. A. Madeira, IST Press (Instituto Superior Técnico), Lisboa, 204-205, 2014.
ISBN: 9789899627666

A közlő folyóiratok összesített impact faktora: 8,355

A közlő folyóiratok összesített impact faktora (az értekezés alapján szolgáló közleményekre): 5,517

A DEENK a Jelölt által az IDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2022.12.15.



Short thesis for the degree of doctor of
philosophy (PhD)

**Development of finite element
simulation-based optimization of
rubber bumper**

Dávid Huri

Supervisor: Tamás Mankovits PhD



UNIVERSITY OF DEBRECEN
Doctoral School of of Informatics

Debrecen, 2022

Table of contents

1. INTRODUCTION	1
2. NEW SCIENTIFIC RESULTS	4
2.1. Selection of a hyperelastic material model suitable for the modeling of the behavior of rubber bumper under compressive load	4
2.2. Selection of the bulk modulus value for the finite element analysis of rubber bumpers.....	6
2.3. Surrogate models usage in two-variables shape optimization task of rubber bumper	8
2.4. Simulated annealing algorithm development for the shape optimization of rubber bumper, elaboration of a case-specific hyperparameter tuning process	11
2.5. Surrogate model-based hyperparameter tuning of optimization algorithm for simulation-driven design problems	14
FUTURE RESEARCH	17
REFERENCES	18
STANDARDS	21
LIST OF PUBLICATIONS	22

1. Introduction

During my research work, I worked on the development of a novel optimization method which is suitable for solving structural optimization problems. A finite element simulation-based two-dimensional shape optimization problem of a rubber bumper was chosen as a case study. The aim was to develop an automated system, that regardless of the behavior of the objective function, can solve simulation-based optimization tasks without the need for human intervention. To accomplish the aforementioned objective, artificial intelligence methods (simulated annealing, support vector regression) were integrated into the design process. Designing rubber products requires special consideration of the numerical discretization process due to the nonlinear behaviors (material nonlinearity, large deformation, connections). Thus, hyperelastic material models were investigated which are suitable for describing material behavior under compressive load. Modeling considerations and error calculations were presented for the finite element analysis of the rubber bumper. Finally, a search algorithm was developed which accurately and cost-effectively can find the optimum for the shape optimization task of the rubber bumper.

Based on the foregoing, I started my research with the fitting and selection of a hyperelastic material model suitable for the finite element modeling of the working characteristics of rubber product under compressive load. The Mullins effect as well as the viscoelastic and hysteretic material behaviors were not modeled because the time dependence was not taken into consideration during the product testing of the rubber bumpers. Hyperelastic material models and the relevant continuum mechanics background were introduced. Rubber samples were machined out of the product because the content of the rubber compounds is a trade secret, and laboratory tests were then carried out using the samples. The stress-strain characteristics of the uniaxial compression test of rubber samples were used to fit the hyperelastic material models (Mooney-Rivlin, Yeoh, Gent, Arruda-Boyce, and Ogden). The laboratory and numerical tests of the rubber

bumper were used to determine the accuracy of the material models. Axisymmetric elements were chosen for the finite element discretization due to the isotropic material, the axisymmetric geometry and the boundary conditions. The results showed, that the Yeoh model performs the best in describing how the rubber product behaves under a complex strain state. When simulating rubber bumpers, the volumetric change has to be taken into consideration. The bulk modulus of the energy function describing the hyperelastic material model can be used to account for this phenomenon. The bulk modulus sensitivity analysis was performed. The results showed that the absolute volumetric change during compression does not exceed 0.13 [%], the bulk modulus value has to be chosen for 1000 [MPa] without the need for laboratory tests.

Based on a technical problem, a two-dimensional shape optimization task using finite element simulation was introduced in my research. The objective function was determined as the difference between the initial and the optimum characteristic and showed a valley shaped behavior which is itself a challenging task for the search algorithms. A simulated annealing algorithm (SA) with an adaptive search space and different cooling schedules was implemented in Matlab environment. Because of the time-consuming objective function call and the stochastic behavior of the SA algorithm, the parameter tuning process is infeasible with the direct call of the finite element simulation task. To solve the tuning process, a novel procedure was introduced using a support vector regression (SVR) surrogate model to test the optimization algorithm performance case-specifically. Sampling took place by means of the maximin Latin Hypercube design method to perform the SVR training where the dataset of 40 samples proved to be suitable to surrogate the two-dimensional shape optimization task of the rubber product.

The operation and the robustness of the SA algorithm were tested by solving optimization test functions. The best performing hyperparameters were selected task-specifically using the empirically obtained discrete hyperparameter domain from the literature. The optimum value is unknown by the algorithm, but it was able to

approach it during the optimization of the mathematical test functions and the shape optimization task. This proved that the developed algorithm and its convergence criterion were correct. The tuned SA algorithm found an optimal design with negligible error from a technical point of view, thereby not increasing the modeling errors further due to the nonlinear material behavior and the large deformation.

Each step of the metamodel-based hyperparameter tuning of the optimization algorithm can be automated, thus eliminating the need for engineering intervention in the simulation-based design processes. The developed method enables the prediction of the development lead time in simulation-driven optimization processes. In terms of the precision and the number of function runs required for optimum determination the tuned SA algorithm proved to be efficient. The determination of the initial temperature on the surrogate model is accurate and saves a significant amount of time. Regardless of the complexity of the simulation task, the time required for the developed method is solely determined by the computation time of the surrogate model. The method aids market competitiveness due to the plannability and the shorter design time.

2. New scientific results

2.1. Selection of a hyperelastic material model suitable for the modeling of the behavior of rubber bumper under compressive load

I investigated the fitting and selection of a hyperelastic material model suitable for the finite element modeling of the working characteristics of rubber product under compressive load. The Mullins effect as well as the viscoelastic and hysteretic material behaviors were not modeled because the time dependence was not taken into consideration during the product testing of the rubber bumpers.

The relevant continuum mechanics theories were introduced for the finite strain and strain-energy density function [1,2]. The hyperelastic constitutive model can be used to simulate the rubber material's large elastic behavior [3]. The material response is approximated by mathematical functions in phenomenological hyperelastic material models. Such model formulations include the Mooney-Rivlin [4,5], the Yeoh [6], the Gent [7], the Arruda-Boyce [8] and the Ogden [9].

The rubber compound of the bumper is a trade secret. According to ISO 48-4 [S1], it has a hardness of 78 Shore A. Rubber samples were machined out of the product according to ISO 23529 [S2], and laboratory tests were then carried out using the ISO 7743 [S3] standard compression method. The stress-strain characteristics of the uniaxial compression test of rubber samples were used to fit the hyperelastic material models (Mooney-Rivlin, Yeoh, Gent, Arruda-Boyce, and Ogden).

The finite element simulation of the uniaxial compression test was used to evaluate the accuracy of the material models. The results showed, that the Mooney-Rivlin and Yeoh material models can predict the material response to the compressive load with an average relative error of 2.5 [%].

The laboratory and numerical tests of the rubber bumper were compared to determine the accuracy of the material models. Axisymmetric elements were chosen for the finite element discretization due to the isotropic material, the axisymmetric geometry and the boundary conditions. In comparison to the values observed during the finite element run of the compression test, the average relative error of the Yeoh material model increased by 3 [%] and the Mooney-Rivlin increased by 7 [%] based on simulation results shown in Figure 1. Nevertheless, the material response to an inhomogeneous strain state can be estimated by the Mooney-Rivlin and Yeoh material models with an error significantly below 10 [%].

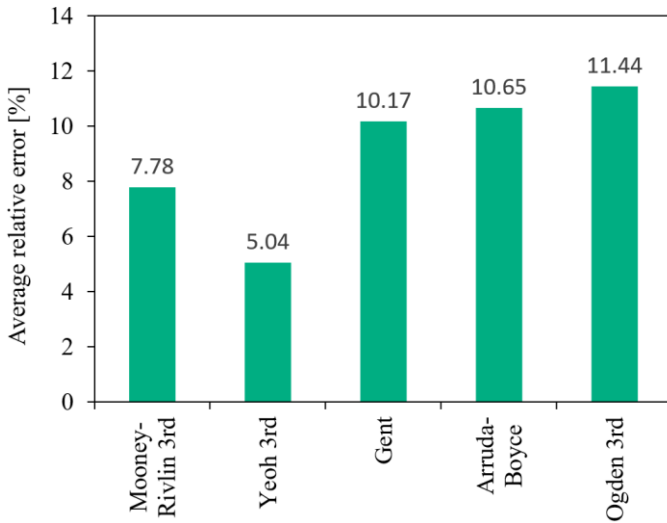


Figure 1. The average relative error of the material models compared to the characteristics of the rubber product

The results showed that in the case when just a set of compressive measurement data is provided, the Yeoh model should be chosen for the curve fitting procedure. The Yeoh model performs the best in describing how the rubber product behaves under an inhomogeneous strain state.

Result 1

Different hyperelastic material models (Mooney-Rivlin, Yeoh, Gent, Arruda-Boyce and Ogden) are able to estimate the Treloar's test data series containing uniaxial and biaxial tension and pure shear stress-strain characteristics of rubber. If the rubber behavior is only determined for the specific load of the product, which in the case of rubber bumpers is the compression, the time needed for the laboratory test can be significantly decreased. Laboratory and numerical tests of a rubber bumper with given compound and complex geometry were used to determine the accuracy of the material models. The results showed, that the Yeoh model performs the best in describing the rubber bumper behavior under a complex strain state.

Relevant publication

Huri, D.; Mankovits, T. Comparison of the Material Models in Rubber Finite Element Analysis. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2018, 393, 012018, doi:10.1088/1757-899X/393/1/012018.

2.2. Selection of the bulk modulus value for the finite element analysis of rubber bumpers

In the case of incompressibility, Poisson's ratio factor is $\nu=0.5$, which denotes that the material's volume change under hydrostatic pressure is zero [2,10]. The fillers and other chemicals content of the rubber compound cause it to behave near- incompressibly, and as a result, the Poisson's ratio is in the region of $0.49 < \nu < 0.5$ [11].

The approximation of the strain energy density function was introduced for the compressible hyperelastic material model [12]. This phenomenon requires the determination of the κ bulk modulus, for which no standard test method exists. Therefore, the bulk modulus selection without the need for laboratory tests was examined. A numerical case study of a cylindrical rubber bumper with metal washers vulcanized on top and bottom was developed for the test, in which it was exposed to a compressive load of up to 50% of the height.

The displacement vectors of the nodes were used in the developed calculation to determine the volumetric strain of the body under deformation. Running the numerical analysis, the results showed that the absolute volumetric strain is below 0.5 [%] when $\kappa \geq 500$ [MPa] is selected.

With the increasing value of the volumetric strain, the strain-energy function of the compressible hyperelastic material becomes more sensitive too. The error in the compressive force was investigated using sensitivity analysis, for which simulations with $\kappa = 2^i$ ($i = 5 \dots 13$) [MPa] values were run. Taking the results of the finite element run with $\kappa = 1024$ [MPa] as a reference, Figure 2 shows the sensitivity of the compressive force relative to the selection of κ .

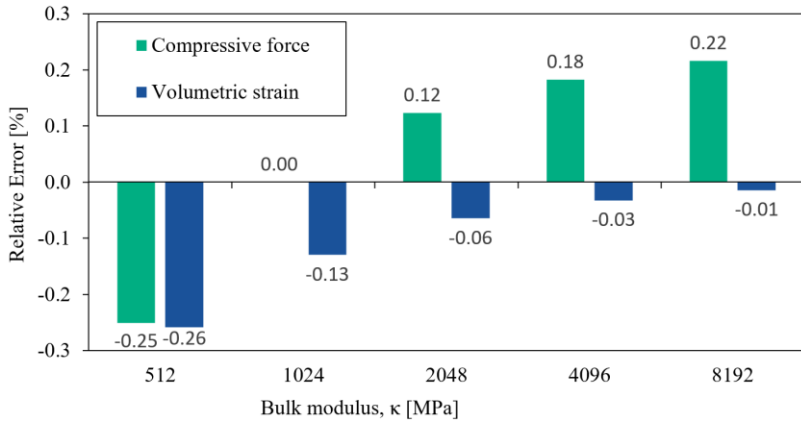


Figure 2. Taking the results of the finite element run with $\kappa = 1024$ [MPa] as a reference, the sensitivity of the compressive force and volumetric strain relative to the selection of κ .

Result 2

When simulating rubber bumpers, the volumetric change has to be taken into account. For this purpose in the energy function describing the hyperelastic material model the bulk modulus (κ) is used. For the determination of the value of the bulk modulus, sensitivity analysis was performed in order to determine the error of the material response. Assuming that the absolute volumetric change during compression does not exceed 0.13 [%] the bulk modulus value has to be chosen for 1000 [MPa] without the need for laboratory tests. Under these conditions, the error of the compressive force is less than 0.25 [%] in the range of 500 [MPa] $\leq \kappa \leq 8000$ [MPa]. For this calculation, a process was developed.

Relevant publication

Huri, D. Incompressibility and Mesh Sensitivity Analysis in Finite Element Simulation of Rubbers. *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.* 2016, 7, 7–12, doi:10.1556/1848.2016.7.1.2.

2.3. Surrogate models usage in two-variables shape optimization task of rubber bumper

Based on a technical problem, a two-dimensional shape optimization task using finite element simulation was introduced. The objective function was determined as the difference between the initial and the optimum characteristic and showed a valley-shaped behavior which is itself a challenging task for the search algorithms.

Running the numerical simulation-based shape optimization task is costly, however, the objective function can be approximated with a surrogate model, the accuracy of which depends on the number of design points and the distribution in the design area. Three-level sampling method is required to describe the nonlinear behavior of the rubber material and the objective function [13]. The optimum prediction capability of surrogate models was compared using the Box-Behnken [14], Central Composite Design (FC-CCD and I-CCD) [15] and the maximin Latin Hypercube [16] sampling methods.

Based on the average relative error of the determined working characteristics, all sampling procedures were good solutions from a technical point of view except for the Box-Behnken design, which can be seen in Figure 3. The metamodel prediction precision fitted to the Maximin Latin Hypercube sampling method equals the tested CCD methods with identical sampling. An advantage of the Optimal Space-Filling is that the number of sampling and thereby the prediction precision of the surrogate model can be further increased while accounting for the calculation cost of the optimization task. Therefore, the Maximin Latin Hypercube with a minimum of 9 pieces of samples is recommended for surrogate modeling of two-dimensional shape optimization tasks of rubber goods.

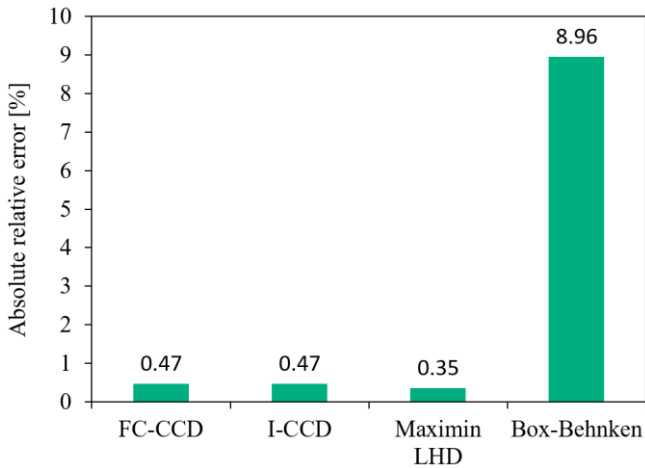


Figure 3. Average relative error of the determined working characteristics of the surrogate models trained for different sampling methods

Training data sets containing 13, 27, 40 and 54 samples were generated with the use of the Maximin LHD method. Because of the small datasets, 10-fold cross-validation [19] was used for the tuning process of the SVR model [17,18] was performed and the root mean square error (RMSE) was calculated for a test dataset. The results showed that the training dataset with the increasing number of

samples improves the accuracy of the SVR model. However, after the training dataset with 40 samples, there was no further improvement in the accuracy. Therefore, the SVR models tuned with 40 samples and cubic kernel function will be used in the later processes.

Result 3

A support vector regression (SVR) model-based method was worked out for two-variables shape optimization task of rubber bumpers. Different Design of Experiment methods (Box-Behnken, Face-Centered- and Inscribed Central Composite Design, maximin Latin Hypercube) which are capable for capturing the nonlinearities of the investigated problem were compared in order to choose the best sampling technique for the supervised machine learning process. The maximin Latin Hypercube design was selected based on the results to establish the minimum number of learning points required for the SVR model to successfully approximate the task. The SVR model that was trained in this manner was suitable to accurately and effectively surrogate the objective function of two-variables shape optimization task of the rubber bumper.

Relevant publications

Huri, D.; Mankovits, T. Surrogate Model-Based Parameter Tuning of Simulated Annealing Algorithm for the Shape Optimization of Automotive Rubber Bumpers. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5451, doi:10.3390/app12115451. (Q2, IF: 2,838 (2021))

Huri, D.; Mankovits, T. Automotive Rubber Product Design Using Response Surface Method. *Period. Polytech. Transp. Eng.* 2022, 50, 28–38, doi:10.3311/PPtr.16280. (Q2, (2021))

Huri, D.; Mankovits, T. Parameter Selection of Local Search Algorithm for Design Optimization of Automotive Rubber Bumper. *Appl. Sci.* 2020, 10, 3584, doi:10.3390/app10103584. (Q2, IF: 2,679)

Huri, D.; Mankovits, T. Automotive Rubber Part Design Using Machine Learning. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 659, 012022, doi:10.1088/1757-899X/659/1/012022.

2.4. Simulated annealing algorithm development for the shape optimization of rubber bumper, elaboration of a case-specific hyperparameter tuning process

A simulated annealing algorithm (SA) [20] with an adaptive search space and different cooling schedules was developed, which pseudocode can be seen in Algorithm 1. It contains four main components, the acceptance function using the Metropolis criterion [21], the generation of the next candidate point, the cooling schedule and the stopping/convergence criterion. Numerous methods are available for the last three components, combining them the following algorithm was developed:

- Based on the Schwefel 1/5 success rule an adaptive search space was used to generate the new candidate, where the step size adaptation factor was chosen as a variable
- The convergence speed of the algorithm highly depends on the cooling function. Therefore different cooling functions (exponential multiplication [20], linear [23], fast cooling [24]) with their parameter settings were investigated.
- The initial value of the temperature was calculated by the equation presented by Aarts & Van Leerhoven [25].

A hyperparameter-optimization process was developed which takes into account the accuracy and the number of function runs required for the convergence of the algorithm. The operation and robustness of the SA algorithm were tested by solving optimization test functions [26]. Multimodal and valley characteristics are common properties of the objective function prescribed for the optimization task. Thus, the *Rosenbrock*, *Six-hump camel*, *McCormick* and *Michalewicz* optimization problems were selected to test the algorithm and its hyperparameter optimization tasks.

The algorithm was able to approach the optimum of the mathematical test functions. This proves the robustness of the developed hyperparameter-optimization method.

- (1) (Initialization)

Select an initial construction $\mathbf{d}_0 \in \Omega$; an initial temperature T_0 , a number of trials per temperature N ; a cooling function $\Lambda(t)$; an initial step size $\boldsymbol{\rho}_0$, a step size adaptation factor β ; the parameters of the convergence criterion m_c and $\boldsymbol{\varepsilon} = (\boldsymbol{\varepsilon}_d, \boldsymbol{\varepsilon}_E)$

Set the counter of the objective function call $m = 0$, the accepted moves $k = 0$ and the cooling cycle $t = 1$

Set the variables of $\mathbf{d}_k = \mathbf{d}_0$, $\mathbf{d}_{opt} = \mathbf{d}_0$, $\boldsymbol{\rho}_t = \boldsymbol{\rho}_0$, $T = T_0$
- (2) (Generate a New Candidate)

do

generate a random step $\mathbf{a}_m(\boldsymbol{\rho}_t) \in \mathbb{R}^n$; $\mathbf{d}_{m+1} = \mathbf{d}_k + \mathbf{a}_m$

while $\mathbf{d}_{m+1} \in \Omega$

$\mathbf{d}_{new} = \mathbf{d}_{m+1}$; ($m = m + 1$)
- (3) (Metropolis Criterion)

calculate $\Delta E = E(\mathbf{d}_{new}) - E(\mathbf{d}_k)$

if $\Delta E < 0$

$\mathbf{d}_{k+1} = \mathbf{d}_{new}$; ($k = k + 1$)

if $\mathbf{d}_{new} < \mathbf{d}_{opt}$, $\mathbf{d}_{opt} = \mathbf{d}_{new}$

else

generate a uniformly distributed random number (r) in the interval $(0,1)$

if $r < P_t = \exp(-\Delta E/T_t)$; $\mathbf{d}_{k+1} = \mathbf{d}_{new}$, ($k = k + 1$)

end
- (4) (Cooling Schedule, Step Size Adaptation)

if $m\%N = 0$

$T_t \rightarrow T_{t+1}$, call the cooling function $\Lambda(t)$

Calculate χ_{10N} , then $\boldsymbol{\rho}_t \rightarrow \boldsymbol{\rho}_{t+1}$, call the adaptive step size control; ($t = t + 1$)

end
- (5) (Stopping and Convergence Criteria)

if $m > m_c$

if $\mathcal{C}(cc_1, cc_2, sc) = 1$, check for stopping/convergence criterion

stop the search with results \mathbf{d}_{opt} , $E(\mathbf{d}_{opt})$, m

else

go to step 2

end

end

Result 4

A simulated annealing algorithm with an adaptive search space and different cooling schedules was developed for the shape optimization of rubber bumper. A hyperparameter tuning optimization process was developed and its operation was tested by solving optimization test functions (Rosenbrock, Six-hump camel, McCormick, Michalewicz). The algorithm was terminated using the best performing hyperparameters in a sufficiently good environment of the global optimum for each test function, proving the robustness of the method and the applicability of the algorithm for the shape optimization task of rubber bumpers.

Relevant publication

Huri, D.; Mankovits, T. Surrogate Model-Based Parameter Tuning of Simulated Annealing Algorithm for the Shape Optimization of Automotive Rubber Bumpers. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5451, doi:10.3390/app12115451. (Q2, IF: 2,838 (2021))

2.5. Surrogate model-based hyperparameter tuning of optimization algorithm for simulation-driven design problems

The aim was to develop a novel method for the adaptation of simulated annealing hyperparameters, which occurs in computationally intensive simulation-based optimization tasks. Because of the time-consuming objective function call and the stochastic behavior of the SA algorithm, the hyperparameter-tuning process is infeasible with the direct call of the finite element simulation task. The main idea of the research was to test the algorithm while running on a surrogate model which is replacing the time-demanding simulation process.

The developed process can be implemented in three steps, the first of which was the automation of the numerical task (Figure 4.). A program was developed for the automation of the finite element model pre- and post-processing with the direct call of Femap API functions. Two-way communication was used with external software (Matlab) to be able to integrate the developed process into the engineering design cycle.

The machine learning method was selected to surrogate the simulation-based objective function because it can be used regardless of investigated problem behavior or the size of the design variables vector. Dataset using the Maximin Latin Hypercube design method with 40 samples was generated to perform the SVR training.

As a key step in the process, the developed hyperparameter-optimization was carried out. Thus the simulated annealing hyperparameters were tuned for SVR model optimization.

The simulation-based objective function was directly optimized by the simulated annealing method using the tuned hyperparameters (for the SVR model). In terms of precision and the number of function runs required for optimum determination the tuned SA algorithm proved to be efficient. The determination of the initial temperature on the surrogate model is accurate and saves a significant amount of time. Each step of the metamodel-based parameter tuning of the optimization algorithm can be automated, thus eliminating the need

for engineering intervention in simulation-driven optimization processes.

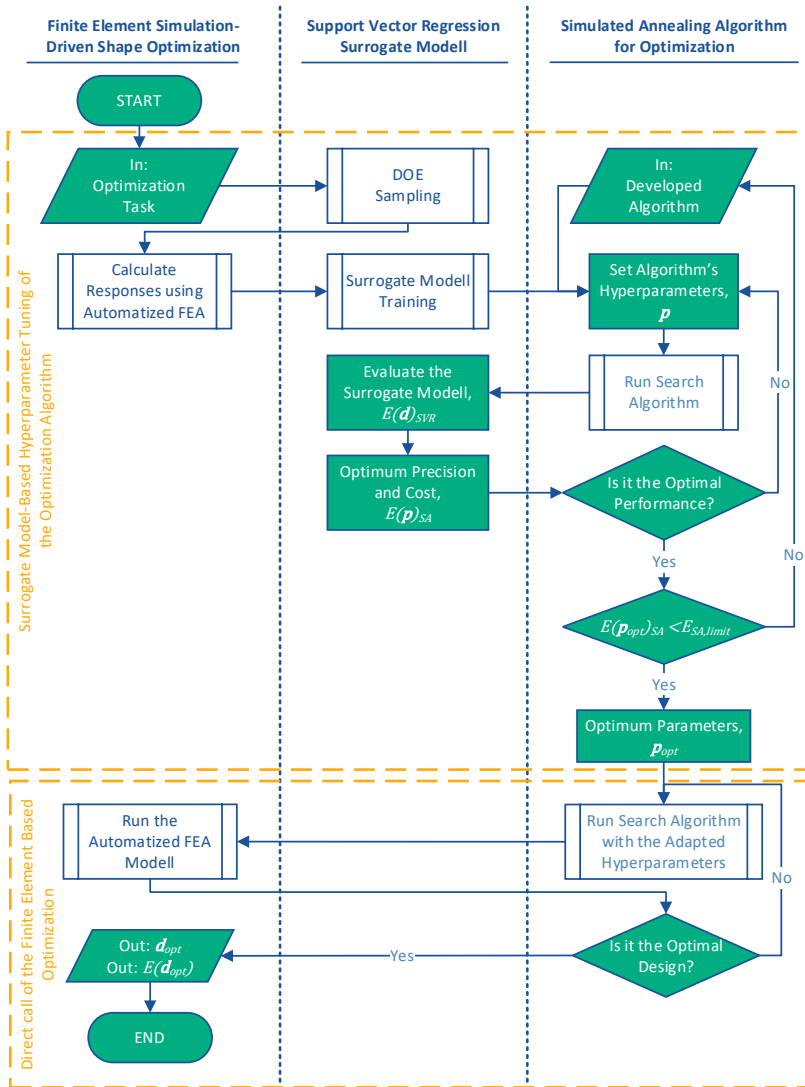


Figure 4. Flowchart of the developed surrogate model-based parameter tuning of an optimization algorithm

Result 5

Due to the stochastic behavior of the simulated annealing algorithm, the hyperparameter tuning of the process is infeasible with the direct call of the simulation-driven optimization task. As a solution, a procedure using surrogate model was developed for testing and for case-specifically tuning the hyperparameters of the optimization algorithm. The novel method is capable to solve the optimization task of the rubber bumper with high accuracy in plannable time and high automation. Due to the automated process, the developed method can be integrated into product development.

Relevant publications

Huri, D.; Mankovits, T. Surrogate Model-Based Parameter Tuning of Simulated Annealing Algorithm for the Shape Optimization of Automotive Rubber Bumpers. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5451, doi:10.3390/app12115451. (Q2, IF: 2,838 (2021))

Huri, D.; Mankovits, T. Parameter Selection of Local Search Algorithm for Design Optimization of Automotive Rubber Bumper. *Appl. Sci.* 2020, 10, 3584, doi:10.3390/app10103584. (Q2, IF: 2,679)

Future research

The developed method opens up numerous new research possibilities. One area is the investigation of large-scale optimization problems for which the SVR surrogate model and the SA algorithm are suitable methods. The surrogate model and the optimization algorithm can be freely chosen in the developed parameter tuning process, allowing for the development of new methods as well as the comparison of those efficiencies. Another extension of the developed method could be the surrogate model-based hyperparameter tuning of various global search algorithms to choose the best performer. The developed method is also suitable for solving not only numerical simulation optimization problems but other computationally intensive model-driven optimizations.

References

1. Bonet, J.; Wood, R.D. *Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis*; 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, 2008; ISBN 978-0-511-39468-3.
2. Kozák, I. *Kontinuummechanika*; Miskolci Egyetemi Kiadó: Miskolc, 1995;
3. Bergström, J. *Mechanics of Solid Polymers*; Elsevier, 2015; ISBN 9780323311502.
4. Rivlin, R.S. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials. I. Fundamental Concepts. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Math. Phys. Sci.* **1948**, *240*, 459–490, doi:10.1098/rsta.1948.0002.
5. Mooney, M. A Theory of Large Elastic Deformation. *J. Appl. Phys.* **1940**, *11*, 582–592, doi:10.1063/1.1712836.
6. Yeoh, O.H. Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1993**, *66*, 754–771, doi:10.5254/1.3538343.
7. Gent, A.N. A New Constitutive Relation for Rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1996**, *69*, 59–61, doi:10.5254/1.3538357.
8. Arruda, E.M.; Boyce, M.C. A Three-Dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials. *J. Mech. Phys. Solids* **1993**, *41*, 389–412, doi:10.1016/0022-5096(93)90013-6.
9. Ogden, R.W.; A, P.R.S.L. Large Deformation Isotropic Elasticity – on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids. *Proc. R. Soc. London. A. Math. Phys. Sci.* **1972**, *326*, 565–584, doi:10.1098/rspa.1972.0026.
10. Holzapfel, G.A. *Nonlinear Solid Mechanics, A Continuum Approach for Engineering*; John Wiley and Sons Ltd: Chichester, 2000; ISBN 047182304X.
11. Mankovits, T. Gumialkatrészek Alakoptimalizálása, University of Miskolc, 2012.

12. Horgan, C.O.; Murphy, J.G. On the Volumetric Part of Strain-Energy Functions Used in the Constitutive Modeling of Slightly Compressible Solid Rubbers. *Int. J. Solids Struct.* **2009**, *46*, 3078–3085, doi:10.1016/j.ijsolstr.2009.04.007.
13. Erdősné Sélley, C.; Gyurecz, G.; Janik, J.; Körtélyesi, G. *Mérnöki Optimalizáció*; Körtélyesi, G., Ed.; Typotex Kiadó: Budapest, HU, 2012; ISBN 9789632795386.
14. Box, G.E.P.; Behnken, D.W. Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables. *Technometrics* **1960**, *2*, 455–475, doi:10.2307/1266454.
15. Box, G.E.P.; Wilson, K.B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *J. R. Stat. Soc. Ser. B* **1951**, *13*, 1–45.
16. Morris, M.D.; Mitchell, T.J. Exploratory Designs for Computational Experiments. *J. Stat. Plan. Inference* **1995**, *43*, 381–402, doi:10.1016/0378-3758(94)00035-T.
17. Cortes, C.; Vapnik, V. Support-Vector Networks. *Mach. Learn.* **1995**, *20*, 273–297, doi:10.1007/BF00994018.
18. Drucker, H.; Burges, C.J.C.; Kaufman, L.; Smola, A.; Vapnik, V. Support Vector Regression Machines. In Proceedings of the Advances in neural information processing systems; MIT Press: Cambridge, 1997; pp. 155–161.
19. Kohavi, R. A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection. In Proceedings of the Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2; Morgan Kaufmann Publishers Inc.: Montreal, Quebec, Canada, 1995; pp. 1137–1145.
20. Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.D.; Vecchi, M.P. Optimization by Simulated Annealing. *Science (80-.)*. **1983**, *220*, 671–680, doi:10.1126/science.220.4598.671.
21. Metropolis, N.; Rosenbluth, A.W.; Rosenbluth, M.N.; Teller, A.H.; Teller, E. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *J. Chem. Phys.* **1953**, *21*, 1087–1092, doi:10.1063/1.1699114.

22. Schwefel, H.-P. *Evolution and Optimum Seeking*; Wiley-Interscience, Ed.; 1st ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, 1995; ISBN 978-0471571483.
23. Randelman, R.E.; Grest, G.S. N-City Traveling Salesman Problem: Optimization by Simulated Annealings. *J. Stat. Phys.* **1986**, *45*, 885–890, doi:10.1007/BF01020579.
24. Szu, H. Fast Simulated Annealing. In *Proceedings of the AIP Conference Proceedings*; AIP, 1986; Vol. 151, pp. 420–425.
25. Aarts, E.H.L.; van Laarhoven, P.J.M. Statistical Cooling: A General Approach To Combinatorial Optimization Problems. *Philips J. Res.* **1985**, *40*, 193–226.
26. Surjanovic, S.; Bingham, D. Optimization Test Functions and Datasets Available online: <https://www.sfu.ca/~ssurjano/optimization.html> (accessed on 8 January 2022).

Standards

- S4. ISO 48-4:2018, Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of hardness — Part 4: Indentation hardness by durometer method (Shore hardness), <https://www.iso.org/standard/74969.html>
- S5. ISO 23529:2016, Rubber — General procedures for preparing and conditioning test pieces for physical test methods, <https://www.iso.org/standard/70323.html>
- S6. ISO 7743:2017, Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of compression stress-strain properties, <https://www.iso.org/standard/72784.html>

List of publications

Refereed journal papers

- P21. Huri, D.; Mankovits, T. Surrogate Model-Based Parameter Tuning of Simulated Annealing Algorithm for the Shape Optimization of Automotive Rubber Bumpers. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5451, doi:10.3390/app12115451. (Q2, IF: 2,838 (2021))
- P22. Huri, D.; Mankovits, T. Automotive Rubber Product Design Using Response Surface Method. *Period. Polytech. Transp. Eng.* 2022, 50, 28–38, doi:10.3311/PPtr.16280. (Q2, (2021))
- P23. Huri, D.; Mankovits, T. Parameter Selection of Local Search Algorithm for Design Optimization of Automotive Rubber Bumper. *Appl. Sci.* 2020, 10, 3584, doi:10.3390/app10103584. (Q2, IF: 2,679)
- P24. Huri, D.; Mankovits, T. Automotive Rubber Part Design Using Machine Learning. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 659, 012022, doi:10.1088/1757-899X/659/1/012022.
- P25. Huri, D.; Mankovits, T. Comparison of the Material Models in Rubber Finite Element Analysis. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018, 393, 012018, doi:10.1088/1757-899X/393/1/012018.
- P26. Huri, D. Incompressibility and Mesh Sensitivity Analysis in Finite Element Simulation of Rubbers. *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.* 2016, 7, 7–12, doi:10.1556/1848.2016.7.1.2.

Journal papers

- P27. Huri, D. Optimáló Módszerek Alkalmazhatósága Járműipari Gumitermékek Tervezésében. *Int. J. Eng. Manag. Sci. / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények* 2020, 5, 358–363, doi:10.21791/IJEMS.2020.2.41.
- P28. Huri, D. Finite Element Software for Rubber Products Design. *Int. J. Eng. Manag. Sci. / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények* 2018, 3, 13–20, doi:10.21791/IJEMS.2018.1.2.
- P29. Mankovits, T.; Huri, D.; Imre, K.; Kocsis, I.T.; Szabó, T. Material Characterization and Numerical Simulation of a Rubber Bumper. *Int. J. Mech. Aerosp. Ind. Mechatron. Manuf. Eng.* 2014, 8, 1367–1370.

- P30. Jacsó, N.; Mankovits, T.; Kállai, I.; Huri, D.; Kocsis, I.T.; Balogh, G. Gumi Próbatétel Laboratóriumi Mérése És Kiértékelése Nyomó Igénybevételre. Debreceni Műszaki Közlemények 2013, 1, 89–97.

Conference proceedings

- P31. Huri, D. Hiperelasztikus Anyagmodellek Illesztése Gumi Anyagra = Fitting Different Hyperelastic Material Model for Rubber Material. In Proceedings of the XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019; 2019; pp. 213–216.
- P32. Huri, D.; Mankovits, T. Comparison of the Material Models in Rubber Finite Element Analysis. In Proceedings of the The 10th International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering; 2018; pp. 42–43.
- P33. Huri, D.; Mankovits, T. Comparison of the Hyperelastic Material Models in the Finite Element Investigations of Rubber Parts. Proc. 6th Int. Sci. Conf. Adv. Mech. Eng. (ISCAME 2018) 2018, 75–76.
- P34. Huri, D. Gumipróbatétel Egytengelyű Nyomóvizsgálata. In Proceedings of the OGÉT 2018: XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: 26th International Conference on Mechanical Engineering.; 2018; pp. 208–211.
- P35. Huri, D. Locking Jelenség Vizsgálata Hiperelasztikus Anyagok Végelem Szimulációjában = Locking Effect Analysis in Finite Element Simulation of Hyperelastic Materials. In Proceedings of the OGÉT 2017: XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia; 2017; pp. 199–202.
- P36. Huri, D.; Mankovits, T. Incompressibility Analysis of Rubbers Using FEM. In Proceedings of the Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016); 2016; pp. 247–253.
- P37. Huri, D.; Mankovits, T.; Kállai, I. Izoparametrikus Végelemek Bezáródásának Vizsgálata Nagy Alakváltozás Esetén = Numerical Investigations on the Locking Effect of Axi-Symmetric Isoparametric Finite Elements. In Proceedings of the Proceedings of the 1st international scientific conference on advances in mechanical engineering (ISCAME 2013): 10-11 October 2013, Debrecen, Hungary; 2013; pp. 70–73.

- P38. Huri, D.; Mankovits, T. Hiperelasztikus Anyagmodellek Kontinuum-Mechanikai Háttére, Optimalizálási Lehetőség Mooney–Rivlin Anyagállandókra. In Proceedings of the Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban, 2012; 2012; pp. 613–622.
- P39. Huri, D.; Mankovits, T.; Portik, T. Gumyszerű Anyagok Végeselemes Vizsgálatának Lehetőségei a FEMAP 9.3 Alkalmazásával = Possibilities of Finite Element Analysis with Hyperelastic Material Models Using FEMAP 9.3. In Proceedings of the Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi régióban 2011; 2011; pp. 531–538.

Conference presentation

- P40. Huri, D.; Mankovits, T. Stochastic Search Algorithm for Design Optimization of Automotive Rubber Parts. In Proceedings of the The 11th International Conference on Applied Informatics; Eger, 2020.



Registry number: DEENK/497/2022.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: Dávid Huri
Doctoral School: Doctoral School of Informatics
MTMT ID: 10044564

List of publications related to the dissertation

Hungarian scientific articles in Hungarian journals (2)

1. **Huri, D.**: Optimáló módszerek alkalmazhatósága járműipari gumitermékek tervezésében.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 5 (2), 358-363, 2020. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2020.2.41>.
2. Jacsó, N., Mankovits, T., Kállai, I., **Huri, D.**, Kocsis, I., Balogh, G.: Gumi próbatest laboratóriumi mérése és kiértékelése nyomó igénybevételre = Laboratory measurements and evaluation of rubber test piece for compression.
Debreceni műszaki közl. 12 (1), 89-97, 2013. ISSN: 1587-9801.

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (3)

3. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Automotive Rubber Product Design Using Response Surface Method.
Per. Polytech. Transport. Eng. 50 (1), 28-38, 2022. ISSN: 0303-7800.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3311/PPtr.16280>
4. **Huri, D.**: Finite Element Software for Rubber Products Design.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 3 (1), 13-20, 2018. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.1.2>.
5. **Huri, D.**: Incompressibility and mesh sensitivity analysis in finite element simulation of rubbers.
Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 7 (1), 7-12, 2016. ISSN: 2062-0810.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/1848.2016.7.1.2>

Foreign language scientific articles in international journals (3)

6. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Surrogate Model-Based Parameter Tuning of Simulated Annealing Algorithm for the Shape Optimization of Automotive Rubber Bumpers.
Appl. Sci.-Basel. 12 (11), 1-22, 2022. EISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app12115451>
IF: 2.838 (2021)





7. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Parameter Selection of Local Search Algorithm for Design Optimization of Automotive Rubber Bumper.
Appl. Sci.-Basel. 10 (10), 1-16, 2020. EISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app10103584>
IF: 2.679
8. Mankovits, T., **Huri, D.**, Kállai, I., Kocsis, I., Szabó, T.: Material Characterization and Numerical Simulation of a Rubber Bumper.
Int. J. Mech. Aerospace Ind. Mechatron. Manufact. Engineer. 8 (8), 1367-1370, 2014. ISSN: 1307-6892.

Hungarian conference proceedings (6)

9. **Huri, D.**: Hiperelasztikus anyagmodellek illesztése gumi anyagra = Fitting Different Hyperelastic Material Model for Rubber Material.
In: XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019. Szerk.: Barabás István, Erdélyi Magyar Tudományos Társaság, Nagyvárad, 213-216, 2019.
10. **Huri, D.**: Gumipróbatest egytengelyű nyomóvizsgálata.
In: 26. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: OGÉT 2018. Szerk.: Csibi Vencel, Barabás István, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), Kolozsvár, 208-211, 2018, (ISSN 2068-1267)
11. **Huri, D.**: Locking jelenség vizsgálata hiperelasztikus anyagok végeelem szimulációjában = Locking Effect Analysis in Finite Element Simulation of Hyperelastic Materials.
In: OGÉT 2017: XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: 25th International Conference on Mechanical Engineering. Szerk.: Csibi Vencel-József, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), Kolozsvár, 199-202, 2017.
12. **Huri, D.**, Mankovits, T., Kállai, I.: Izoparametrikus végeelemek bezáródásának vizsgálata nagy alakváltozás esetén = Numerical investigations on the locking effect of axi-symmetric isoparametric finite elements.
In: Proceedings of the 1st international scientific conference on advances in mechanical engineering (ISCAME 2013) : 10-11 October 2013, Debrecen, Hungary. Szerk.: Mankovits Tamás, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, 70-73, 2013. ISBN: 9789634736233
13. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Hiperelasztikus anyagmodellek kontinuum-mechanikai háttére, optimalizálási lehetőség Mooney-Rivlin anyagállandókra = Continuum mechanics background of hyperelastic material models, optimization possibility of Mooney-Rivlin's material permanents.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2012 : konferencia-előadásai : Szolnok, 2012. május 10.. Szerk.: Pokorádi László, Debreceni Egyetem, Debrecen, 613-621, 2012. ISBN: 9789637064289





14. **Huri, D.**, Mankovits, T., Portik, T.: Gumiszerű anyagok végeeselemes vizsgálatának lehetőségei a FEMAP 9.3 alkalmazásával = Possibilities of finite element analysis with hyperelastic material models using FEMAP 9.3.

In: Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2011 : konferencia előadásai : Miskolc Egyetemváros, 2011. május 18.. Szerk.: Pokorádi László, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 531-538, 2011. ISBN: 9789637064258

Foreign language conference proceedings (3)

15. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Automotive rubber part design using machine learning.

IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 659, 1-6, 2019. ISSN: 1757-8981.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012022>

16. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Comparison of the material models in rubber finite element analysis.

IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 393, 1-7, 2018. ISSN: 1757-8981.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012018>

17. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Incompressibility analysis of rubbers using FEM.

In: Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 247-253, 2016. ISBN: 9789634739449

Foreign language abstracts (1)

18. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Comparison of the hyperelastic material models in the finite element investigations of rubber parts.

In: Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018) : Book of extended abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 75-76, 2018. ISBN: 9789634900511





List of other publications

Hungarian books (2)

19. Mankovits, T., **Huri, D.**: Modellezés és szimuláció: a lineáris rugalmasságtan és a végeelem-módszer. Debreceni Egyetem, Debrecen, 183 p., 2015. ISBN: 9789634738978
20. Sziki, G. Á., Mankovits, T., Hajdu, S., Deák, K., **Huri, D.**: Műszaki mechanika példatár. Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 239 p., 2015. ISBN: 9789634739098

Foreign language international book chapters (1)

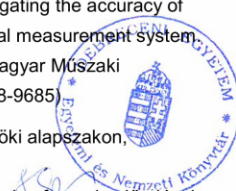
21. Rashwan, A., **Huri, D.**, Mankovits, T.: Numerical Investigation of 3D Lattice Infill Pattern Cellular Structure for Orthopedic Implant Design.
In: KOD 2021: International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering. Eds.: Cavic Maja, Mitrovic Radivoje, Rackov Milan, Springer International Publishing Ag, Berlin, 467-472, 2022, (Mechanisms and Machine Science, ISSN 2211-0984 ; 109.) ISBN: 9783030884659

Foreign language scientific articles in international journals (2)

22. File, M., Mankovits, T., **Huri, D.**: Optical Investigation of the Limits of Modeling the Nonlinear Elastic Behavior of PA6 Using Linear Elastic Material Models.
Appl. Sci.-Basel. 12 (3), 1-16, 2022. ISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app12031057>
IF: 2.838 (2021)
23. Vámosi, A., Mankovits, T., **Huri, D.**, Kocsis, I., Szabó, T.: Comparison of Different Data Acquisition Techniques for Shape Optimization Problems.
Int. J. Mech. Aerospace Ind. Mechatron. Manufact. Engineer. 9 (3), 346-349, 2015. ISSN: 1307-6892.

Hungarian conference proceedings (3)

24. File, M., **Huri, D.**, Mankovits, T.: Lineárisan rugalmas anyagmodell pontosságának vizsgálata poliamid modellezésekor optikai mérőrendszer segítségével = Investigating the accuracy of the linear elastic material models when modelling PA6 using an optical measurement system
In: XXX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia - OGÉT 2022, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), Kolozsvár, 128-131, 2022, (ISSN 2668-9685)
25. **Huri, D.**, Fazekas, L., Balogh, G.: Lemorzsolódó hallgatók a gépészmérnöki alapszakon, részismereti tudás beszámítása az OKJ képzésbe.
In: Műszaki tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2015 : konferencia előadásai : Debrecen, 2015. június 11.. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 412-417, 2015. ISBN: 9789637064326





26. Kállai, I., Major, Z., Czél, G., Mankovits, T., **Huri, D.**: Alakváltozási sebesség és geometriai tényezők hatása uhmwpe szilárdsági tulajdonságaira = The effect of load rate and geometrical factors on the mechanical properties of uhmwpe.
In: Proceedings of the 1st international scientific conference on advances in mechanical engineering (ISCAME 2013) : 10-11 October 2013, Debrecen, Hungary.. Szerk.: Mankovits Tamás, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, 79-84, 2013. ISBN: 9789634736233

Foreign language conference proceedings (3)

27. File, M., Kállai, I., **Huri, D.**, Mankovits, T.: Optical Investigation of the Strain Distribution with Different Orientations on Aerospace Composite Material.
Lect. Notes Mech. Eng. 2023, 549-557, 2023. ISSN: 2195-4356.
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_45
28. File, M., Cseke, R., **Huri, D.**, Balogh, G., Mankovits, T.: Finite element analysis of closed-cell aluminum foam approximated with Weaire-Phelan unit cell structure.
IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 1246, 1-7, 2022. ISSN: 1757-8981.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012002>
29. Mankovits, T., Vámosi, A., Kocsis, I., **Huri, D.**, Kállai, I., Szabó, T.: Shape design of axially symmetric rubber part using finite element method and support vector machines.
In: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2015). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 114-119, 2015. ISBN: 9789634739173

Foreign language abstracts (3)

30. Al, J. M., **Huri, D.**: Fundamental considerations for finite element modeling of a polyurethane foam jounce.
In: 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2019) 7-9 November, 2019 Debrecen, Hungary : Conference Proceedings : Book of Extended Abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 3-4, 2019. ISBN: 9789634901686
31. **Huri, D.**, Mankovits, T.: Comparison of the material models in rubber finite element analysis.
In: Book of Abstract : The 10th International Conference [on] Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, KOD 2018, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, 42-43, 2018. ISBN: 9788660220594





32. Mankovits, T., Kocsis, I., Szabó, T., Vámosi, A., **Huri, D.:** SVR and FEA Based Shape Optimization on Air Spring Bumpers.

In: Book of Abstracts of the 4th International Conference on Engineering Optimization. Ed.: H. C. Rodrigues, J. Herskovits, C. M. Mota Soares, J. M. Guedes, A. L. Araújo, J. O. Folgado, F. Moleiro, J. F. A. Madeira, IST Press (Instituto Superior Técnico), Lisboa, 204-205, 2014.
ISBN: 9789899627666

Total IF of journals (all publications): 8,355

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 5,517

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

15 December, 2022

