

## Paraméterillesztő szoftver a „Two-Layer Viscoplastic” anyagmodellhez

### Parameter calibration software for the „Two-layer Viscoplastic” model

*HORVÁTH András Levente (PhD hallgató), Dr. KOSSA Attila (egyetemi docens)*

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanikai Tanszék  
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. (MM épület), Tel.: +36 1 463 1369, Fax: +36 1 463 3471  
E-mail: [kossa@mm.bme.hu](mailto:kossa@mm.bme.hu) Web: <http://www.mm.bme.hu>

#### Kivonat

*A „Two-Layer Viscoplastic” anyagmodell egyszerre képes leírni az anyagok rugalmas, képlékeny és viszkózus viselkedését. Az anyagparaméterek meghatározása egy többdimenziós optimalizálási feladatként fogalmazható meg, ahol a paraméterek megfelelő megválasztásával minimalizáljuk a mért és szimulált viselkedés közötti különbséget. A dolgozatban egy saját szoftver kerül bemutatásra, ami a fenti problémára a korábbinál lényegesen hatékonyabb megoldást szolgáltat.*

**Kulcsszavak:** anyagparaméter, optimalizálás, „Two-Layer Viscoplastic” modell

#### Abstract

*The „Two-Layer Viscoplastic” material model can describe the elastic, plastic, and viscous behaviors as well. The calibration of the material parameters can be defined as a multidimensional optimization problem, where the difference between the measured and simulated behaviors has to be minimized via appropriate choice of the material parameters. In this article, a new software is introduced, which can provide results significantly faster, than a previously applied method.*

## 1. BEVEZETÉS

Az utóbbi évtizedekben egyre fontosabbá váltak a számítógépes szimulációk a mérnöki gyakorlatban. A mechanikai számítások pontosságához számos dolog szükséges, többek között a feladatnak megfelelő anyagmodell használata és az anyagparaméterek pontos ismerete. Emiatt az anyagparaméterek meghatározása gyakori feladat a mérnöki gyakorlatban. Az összetett jelenségek modellezéséhez bonyolultabb anyagmodellekre van szükség, melyek figyelembe tudják venni az anyagi viselkedés sajátosságait. Ezeknek általában sok paramétere van, melyek meghatározása nemtriviális feladat. Jelcikk a „Two-Layer Viscoplastic” modellt [1] mutatja be, majd egy paraméterillesztési feladaton keresztül ismerhetjük meg a vizsgált modell pontosságát és alkalmasságát. A paraméterillesztési eljárást saját fejlesztésű Python szoftver segítségével valósítjuk meg.

## 2. PARAMÉTERILLESZTÉS

### 2.1 Kísérletsorozaton alapuló módszer

Az általunk vizsgált anyagmodellhez az ABAQUS által javasolt paramétermeghatározó eljárás egy kísérletsorozaton alapul [2]. Ebben az egyes kísérletek mindegyike az anyag egy-egy jellemző viselkedésére fókuszál. Bár így is meghatározhatók a keresett anyagparaméterek, a módszernek számos hátránya is van. A folyamat során több feltételezéssel is élnünk kell, így a kapott eredmények pontossága megkérdőjelezhető. Ezen felül számos kísérlet elvégzése szükséges, ami időigényes, valamint minden kísérlethez új próbatest használata szükséges, emiatt a költségvonzatai is jelentősebbek.

## 2.2 Általános módszer

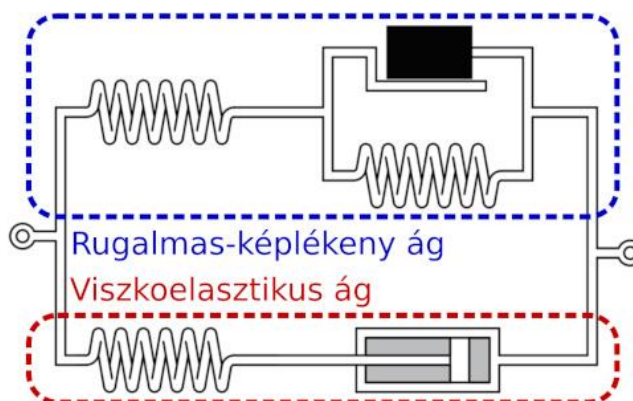
A paraméterek értéke általánosan meghatározható egyetlen mérési adatsorból, számítógépes optimalizálási eljárás segítségével. Ennek során a mérési adatsorból származó terhelési esetre a konstitutív egyenletet megoldjuk bizonyos anyagparaméterekkel, majd a kapott megoldást a feszültségekre összehasonlítjuk a mért értékekkel. Ezek után az optimalizáló algoritmus meghatározza a következő kiszámolandó paraméterkombinációt. Ezeket a lépéseket addig ismételjük, amíg a mért és szimulált viselkedés különbsége „kellően kicsi”, elfogadható nem lesz.

Ez a módszer minden paramétert figyelembe vesz, és egyszerre illeszti őket, valamint nem használ feltételezéseket az értékek meghatározásakor. Így a kapott eredmények várhatóan pontosak lesznek. Ezen felül gyorsabban és kevesebb mérésből ad eredményt, mint a kísérletsorozaton alapuló módszer.

## 3. A „TWO-LAYER VISCOPLASTIC” MODELL

A „Two-Layer Viscoplastic” modellt (innenről: TLVP modell) Kichen publikálta 1992-ben [3, 4]. A TLVP modell elérhető az ABAQUS végesesemes programban mint beépített anyagmodell. Bár a modell eredetileg polimerekhez lett kifejlesztve, az ABAQUS magas hőmérsékletű fémekhez is javasolja a használatát [2].

A modell két párhuzamosan kapcsolt ágból tevődik össze (Lásd: 1. ábra.). Az ágakban a konkrét elemek nincsenek megszabva, csak a viselkedésük mechanikai jellege, így a modellnek számtalan változata felírható.



1. ábra A TLVP modell felépítése

### 3.1 Rugalmas-képlékeny ág

Az általunk használt felírásban a rugalmas-képlékeny rész lineáris izotropikus keményedést alkalmaz, melyet 3 paraméterrel írhatunk le:

- $K_p$  – rugalmassági modulusz [MPa],
- $H$  – képlékeny keményedési modulusz [MPa],
- $\sigma_{Y0}$  – a kezdeti folyáshatár [MPa].

Az 1D esethez tartozó konstitutív egyenletek az alábbiak:

$$\text{Folyási függvény: } F = |\sigma| - \sigma_Y \leq 0, \quad (1)$$

$$\text{rugalmas eset } (F < 0): \quad \dot{\sigma}_p = K_p \dot{\epsilon}, \quad (2)$$

$$\text{rugalmas-képlékeny eset } (F = 0): \quad \dot{\sigma}_p = E_{ep} \dot{\epsilon} = \frac{K_p H}{K_p + H} \dot{\epsilon}. \quad (3)$$

Az egyenletek numerikus megoldását a rugalmas és képlékeny tartomány határának analitikus meghatározásának segítségével végeztük.

### 3.2 Viszkoelasztikus ág

A viszkoelasztikus ágban egy lineáris rugalmas és egy nemlineáris („time-hardening creep”), csillapítás-jellegű elem található. Ez az ág 4 paraméterrel írható le az általunk vizsgált modellben:

- $K_v$  – rugalmassági modulusz [MPa],
- $A$  – nemlineáris tag szorzója [-],
- $n$  – a feszültség kitevője [-],
- $m$  – az idő kitevője [-] ( $-1 < m < 0$ ).

Az ág viselkedése a következő differenciálegyenlettel írható le (1D-s felírás):

$$\dot{\sigma}_v = K_v \dot{\epsilon} - K_v A \sigma_v^n t^m. \quad (4)$$

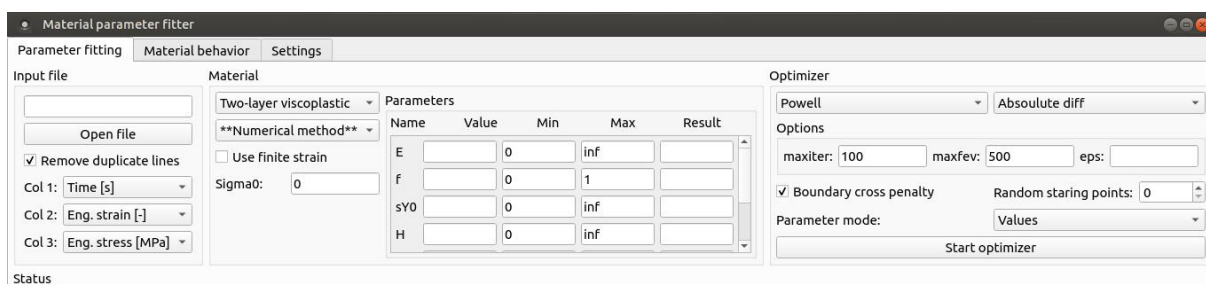
A fenti egyenletnek analitikus megoldása nem ismert. Fontos megjegyezni, hogy a numerikus implementálás során  $\sigma_v^n$  helyett  $\text{sign}(\sigma_v)|\sigma_v|^n$ -t kell használnunk annak érdekében, hogy a fenti egyenlet nyomás esetére is alkalmazható legyen.

A két ágban ébredő feszültség összege adja a TLVP modellben lévő feszültséget.

## 4. ELKÉSZÍTETT PYTHON PROGRAM

### 4.1 Megvalósítás

Számos előnye miatt a program Python nyelven készült el [5]. Ehhez a nyelvhez számos jól megírt és logikus felépítésű modul érhető el, amik a program megírását számottevően megkönnyítették. A legfontosabb célkitűzések a hatékonyság, a könnyű használat és a moduláris felépítés voltak. Az elkészült grafikus felület egy része illusztrálás végett a 2. ábrán látható.



2. ábra A paraméterillesztés beállításai a grafikus felületen

### 4.2 Az optimalizáló legfontosabb beállításai

Számos algoritmus és beállítás kipróbálása után a leghatékonyabbnak a Pythonhoz elérhető SciPy modul SLSQP algoritmusának bizonyult. Az anyagparaméterek értéke között sok nagyságrend eltérés van, ezért a programban a paramétereket az alsó és felső határaik alapján 0 és 1 közé transzformálhatjuk egy beállítás segítségével. Ez több algoritmus teljesítményét jelentősen javítja.

## 5. EREDMÉNYEK

Az elkészült programmal elvégeztük a paraméterillesztést egy mérési sorozat adatain, ami különböző hőmérsékleten vizsgált egy MC-PET polimerhabot [6]. A kapott eredmények az 1. táblázatban láthatók. Az ABAQUS jelöléseinek megfelelően:

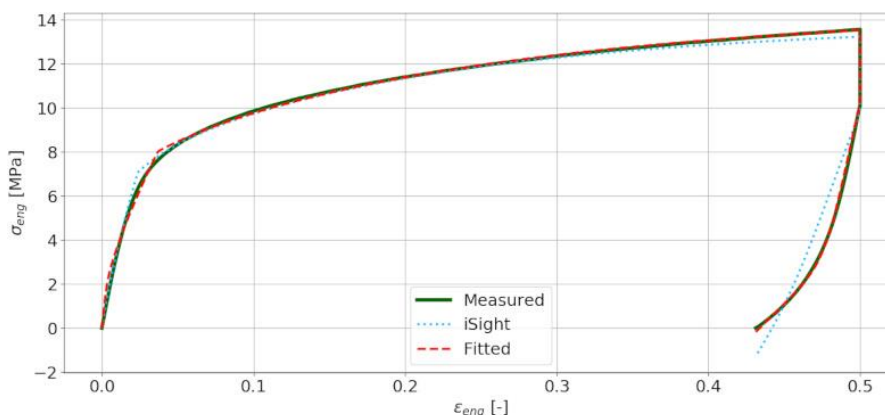
$$E = K_p + K_v, \quad f = \frac{K_v}{K_p + K_v}. \quad (5)$$

A programot összevetettük egy korábban alkalmazott módszerrel, amely az ABAQUS-t használta az iSight külső optimalizálóval [6]. Míg a korábbi módszernek egy mérés kiértékelése sok órába telt, az új program ugyanezt 1-3 perc alatt hajtotta végre. Ezen felül az új módszerrel kapott eredmények pontosabban követik a mérési adatokat a korábbinál. (Lásd: 3. ábra.)

A kapott paraméterértékek

1. táblázat

T [°C]	E [MPa]	f [-]	$\sigma_{Y0}$ [MPa]	H [MPa]	A [ $10^{-3}$ ]	n [-]	m [-]
21	807,302	0,733	5,231	28,726	0,763	3,357	-0,782
60	669,398	0,753	3,268	26,953	0,455	3,654	-0,723
75	501,825	0,743	0,0	32,343	0,106	3,519	-0,230
83	468,175	0,772	0,0	30,904	0,242	3,469	-0,331
90	416,924	0,773	0,0	30,035	0,641	3,235	-0,389
97	375,541	0,798	0,0	30,010	1,524	3,231	-0,477
106	364,491	0,828	0,0	29,806	2,721	3,494	-0,587
120	300,143	0,793	0,0	24,510	12,747	3,112	-0,641



3. ábra Az új (piros, szaggatott) és korábbi (kék, pontozott) módszerrel illesztett görbék

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A kitűzött célokat az elkészített program teljesíti. A korábbi módszerhez képest pontosabb eredményeket adott, nagyságrendekkel gyorsabban. Bár az eddig munka fókuszában a TLVP modell állt, a moduláris felépítés miatt más anyagmodellekkel is bővíthető a meglévő program.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az előadó részvételét az OGÉT 2020 konferencián az NTP-HHTDK-19-0068 azonosítójú, „A hazai Tudományos Diákköri műhelyek és rendezvények támogatása” pályázat támogatta. Szerző köszönetét fejezi ki a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj során kapott támogatásért. Szerző köszönetét fejezi ki az NKFIH FK 128662 projekt keretében kapott támogatásért.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] ABAQUS weboldal: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
- [2] ABAQUS dokumentáció: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-viscous.htm>
- [3] J. Kichenin: *Comportement Thermomécanique du Polyéthylène - application aux structures gazieres*, Ecole Polytechnique, Paris, France, 1992.
- [4] Berezvai, Sz.; Kossa, A.: *Characterization of a thermoplastic foam material with the two-layer viscoplastic model*, Materials Today: Proceedings 4, 5749-5754, 2017
- [5] Python Software Foundation weboldal: <https://www.python.org/about/>
- [6] Berezvai, Sz.; Kossa, A.: *Performance of a parallel viscoelastic-viscoplastic model for a microcellular thermoplastic foam on wide temperature range*, Polymer Testing 84, 106395, 2020