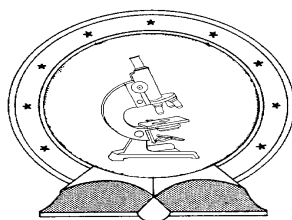


DE TTK



1949

**SZERKEZETI ANYAGOK
TULAJDONSÁGVÁLTOZÁSAINAK VIZSGÁLATA
REZGÉSDIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREKKEL**

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Kocsis Dénes László

Témavezető: Dr. Horváth Róbert

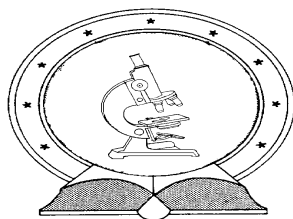
DEBRECENI EGYETEM

Természettudományi Doktori Tanács

Kémiai Doktori Iskola

Debrecen, 2015.

DE TTK



1949

**SZERKEZETI ANYAGOK
TULAJDONSÁGVÁLTOZÁSAINAK VIZSGÁLATA
REZGÉSDIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREKKEL**

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Kocsis Dénes László
Témavezető: Dr. Horváth Róbert

DEBRECENI EGYETEM
Természettudományi Doktori Tanács
Kémiai Doktori Iskola
Debrecen, 2015.

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi Doktori Tanács Kémiai Doktori Iskola K/4 Makromolekuláris és felületi kémia programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Debrecen, 2015. szeptember 14.

Kocsis Dénes László

Tanúsítom, hogy Kocsis Dénes László. doktorjelölt 2009 - 2012 között a fent megnevezett Doktori Iskola K/4 Makromolekuláris és felületi kémia programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Az értekezés elfogadását javasolom.

Debrecen, 2015. szeptember 14.

Dr. Horváth Róbert

SZERKEZETI ANYAGOK
TULAJDONSÁGVÁLTOZÁSAINAK VIZSGÁLATA
REZGÉSDIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREKKEL

Értekezés a doktori (PhD) fokozat megszerzése érdekében
a Kémia tudományágban

Írta: **Kocsis Dénes László** okleveles műszaki menedzser és környezetmérnök
(BSc)

Készült a Debreceni Egyetem Kémiai Doktori Iskolája
(Makromolekuláris és felületi kémia programja) keretében

Témavezető: **Dr. Horváth Róbert** nyugalmazott főiskolai tanár

A doktori szigorlati bizottság:

elnök: Dr. Sóvágó Imre

tagok: Dr. Marossy Kálmán

Dr. Nagy Miklós

A doktori szigorlat időpontja: 2015. április 9.

Az értekezés bírálói:

Dr. Belina Károly

Dr. Ráthy Istvánné

A bírálóbizottság:

elnök: Dr. Antus Sándor

tagok: Dr. Kóródi Ferenc

Dr. Lázár István

Dr. Marosi György

Dr. Zsuga Miklós

Az értekezés védésének időpontja: 20...

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Köszönetemet fejezem ki témavezetőmnek *Dr. Horváth Róbertnek*, Debreceni Egyetem Műszaki Karának nyugalmazott főiskolai tanárának a munkám során nyújtott szakmai útmutatásáért, hasznos tanácsaiért, támogatásáért.

Köszönettel tartozom *Dr. Kéki Sándor* egyetemi tanárnak, a Kémiai Tudományok Doktori Iskola Makromolekuláris és felületi kémia alprogram vezetőjének a szakmai iránymutatásért és támogatásért.

Szeretném megköszönni továbbá *Dr. Bodnár Ildikó* főiskolai tanárnak, a Környezet- és Vegyészmérnöki Tanszék vezetőjének, hogy mindvégig figyelemmel kísérte és segítette munkámat.

Köszönöm a szerzőtárs kollégáknak, kiemelten *Dr. Deák György* egyetemi docensnek és *Dr. Dezső Gergely* főiskolai tanárnak a szakmai segítséget.

Külön köszönöm *Dr. Asszonyi Csabának*, a Montavid kutatócsoport vezetőjének a munkám során nyújtott támogatását és szakmai segítségét. Köszönöm továbbá a Montavid kutatócsoport tagjainak, kiemelten *Dr. Fülöp Tamásnak*, *Dr. Ván Péternek* és *Dr. Szarka Zoltánnak* a hasznos gyakorlati tanácsokat.

Szintén köszönetemet szeretném kifejezni *Dr. Marossy Kálmán* tanszékvezető egyetemi tanárnak a mérések során nyújtott segítségéért és szakmai tanácsaiért.

Köszönöm továbbá *Székács István* műszaki oktatónak a kísérletek elvégzéséhez nyújtott nélkülözhetetlen segítségét.

Hálával tartozom a Debreceni Egyetem Műszaki Kar vezetésének, valamint a Környezet- és Vegyészmérnöki Tanszék valamennyi munkatársának illetve mindazoknak, akik valamilyen formában hozzájárultak az értekezés elkészítéséhez.

Végül megköszönöm azoknak, akik a következő pályázatok kapcsán a munkámhoz anyagi segítséget nyújtottak: TÁMOP-4.2.2/08/1-2008-0017, TÁMOP-4.2.2. A-11/1/KONV-2012-0041.

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Jelölés	Jelentés
G	rugalmassági modulus
η	viszkozitási tényező
θ	tehetetlenségi tényező
τ	relaxációs idő
σ	feszültség
σ^d	deviatorikus (torzulási) feszültség
ε	alakváltozás
$\varepsilon_{\parallel}$	longitudinális (hosszirányú) alakváltozás
ε_T	transzverzális (keresztirányú alakváltozás
ε^d	deviatorikus (torzulási) alakváltozás
T_g	üvegesedési hőmérséklet
T	feszítőerő
μ	hosszegységre jutó tömeg
C	húr csillapítási tényezője
A_0	amplitúdó
β	csillapítási tényező
f	frekvencia
φ	fázis
f_t	szöggyorsulás
R_m	szakítószilárdság
A	szakadási nyúlás
E	Young (rugalmassági) modulus
r	korrelációs koefficiens
f_0	sajátfrekvencia

l	hossz
I	tehetlenségi nyomaték a keresztmetszetben
m	folyómétertömeg
λ	frekvencia faktor
R	csőfal középsugara
ρ	sűrűség
ν	Poisson szám
t	cső falvastagsága
i	modus

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	1
2. Irodalmi áttekintés.....	3
2.1. Anyagtulajdonság vizsgálatok	3
2.1.1. Anyagmodellek	3
2.1.2. Öregedés, öregítés	8
2.2. Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok	12
3. Felhasznált anyagok és módszerek.....	16
3.1. Mesterségesen öregített lágy PVC kúszás és relaxációs vizsgálata	16
3.1.1. Vizsgált anyag	16
3.1.2. Felhasznált eszközök.....	17
3.1.3. A kísérletsorozat technikai megvalósítása.....	17
3.2. PVC szálak rezgőhúrként történő vizsgálata mesterséges öregítéssel	20
3.2.1. Vizsgált anyag	21
3.2.2. Felhasznált eszközök.....	21
3.2.3. A kísérletsorozat technikai megvalósítása.....	22
3.3. Csövek tönkremenetelének vizsgálata rezgésdiagnosztikai eszközökkel	24
3.3.1. Vizsgált anyag	24
3.3.2. Felhasznált eszközök.....	25
3.3.3. A kísérletsorozat technikai megvalósítása.....	25
4. Kísérleti eredmények és értékelésük	29
4.1. Mesterségesen öregített lágy PVC kúszás és relaxációs vizsgálata	29
4.1.1. Kúszás	30
4.1.2. Relaxáció.....	35
4.1.3. Kúszás és relaxációs kísérletek eredményeinek értékelése	41
4.2. PVC szálak rezgőhúrként történő vizsgálata mesterséges öregítéssel	42
4.2.1. A rezgőhúr kísérletsorozat eredményeinek értékelése	48
4.3. Csövek tönkremenetelének vizsgálata rezgésdiagnosztikai eszközökkel	49
4.3.1. Csőrezgés kísérletsorozat eredményei.....	52
4.3.2. Csőrezgés kísérletsorozat eredményeinek értékelése	58
5. Összefoglalás	60
6. Summary	62
7. Tudományos publikációk	66
8. Irodalmi hivatkozások.....	73
9. Mellékletek.....	85
10. Ábrajegyzék	89
11. Táblázatjegyzék	90

1. BEVEZETÉS

A rezgésdiagnosztikai technikákat egyre szélesebb körben alkalmazzák a legkülönbözőbb műszaki problémák megoldására. Felhasználási területük és alkalmazásuk meglehetősen sokrétű, és jelenleg is egyre bővül.

A téma aktualitását ipari szereplők káresetei igazolják, ahol geotermikus energia szállítására szolgáló különböző anyagú csővezetékek eltömődése és törése is igen gyakran előfordult.

Kutatócsoportunkkal szerkezeti anyagok tulajdonságváltozásainak rezgésdiagnosztikai eszközökkel történő vizsgálatát tűztük ki célként. Kutatásaink során többfajta műanyagot, valamint fém és humán csontalapú elemeket is vizsgáltunk. Ezen értekezésben elsősorban PVC-ből készült próbatestek esetén kapott eredmények kerülnek bemutatásra. A kísérletekhez különböző átmérőjű PVC szálakból készítettünk próbatesteket, valamint PVC és rozsdamentes acélcsöveket vizsgáltunk rezgésdiagnosztikai módszerekkel.

Vizsgálataink fontos részét képezte a próbatestek öregedésével kapcsolatos tulajdonságváltozások vizsgálata. Műanyag termékek esetén különösen fontos a fizikai és kémiai öregedés hatásainak vizsgálata, hiszen ezen folyamatok gyakran vezetnek az anyag tönkremeneteléhez jóval az előzetesen megbecsült élettartamot megelőzően. Ennek megfelelően a vizsgálati anyagok tulajdonságváltozásait értékeltük különböző időtartamú mesterséges öregítéseket követően.

Az értekezésben bemutatott kísérletek során első lépésben PVC próbatesteken folytattunk komplex kúszás és relaxációs kísérleteket az anyag kúszási és relaxációs paramétereinek vizsgálatára. Ezek esetében különböző anyagmodellek alkalmazhatóságát, illetve a megfelelő pontosságú modellezéshez szükséges anyagi paraméterek számát vizsgáltuk. A megfelelő

modellek meghatározása után vizsgáltuk az egyes anyagi paraméterek értékeinek változását UV fénnnyel történő mesterséges öregítés következtében.

A második kísérletsorozat során a meghatározott ideig UV fénnnyel mesterségesen öregített PVC szálakat egy rezgőasztalra húrként kifeszítettük, majd pendítés után vizsgáltuk a csillapított rezgőmozgást. A rezgőmozgás paramétereinek értékeiből szintén az anyagi degradáció meghatározása volt a célunk.

A harmadik kísérletsorozatot csöveken végeztük, amelyek belső falára különböző vastagsággal vittünk fel anyagot, a csövek egyik jellemző tönkremenetelét, a keresztmetszet-szűkülést modellezve. Az eltérő állapotú csöveken végzett rezgésdiagnosztikai vizsgálatok révén meghatároztunk olyan rezgésparamétereket, amelyek jellemzik a csövek degradációs állapotát.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Anyagtulajdonság vizsgálatok

2.1.1. Anyagmodellek

Az anyag viselkedésének leírására a szakirodalomban számos anyagmodell született. Ezek közül a legáltalánosabb modellek az úgynevezett egyelemű, vagy más néven alapmodellek. A reológiai irodalomban négy ilyen elem jelenik meg: ideális rugó, ideális viszkózus elem, ideális tehetetlenségi elem, és ideális képlékenységi elem [1].

Az ideális rugó, vagy más néven a Hooke-elem a feszültség és a deformáció közötti lineáris kapcsolatot modellezi a rugóállandó (G) segítségével. Az elemet önmagában a rugalmas Hooke-test vizsgálatára alkalmazzák.

Az úgynevezett Newton-elem az ideálisan viszkózus elem másik, gyakran használt megnevezése. Ez az elem a feszültség és a deformációsebesség közötti lineáris kapcsolatot reprezentálja a viszkozitási tényező (η) segítségével. Önmagában alkalmazva a Newton-féle viszkózus folyadék vizsgálatára használják.

Az ideális tehetetlenségi elem az úgynevezett Verhás-elem [2], amelyet egy zérustömegű, θ fajlagos tehetetlenségi nyomatékkal rendelkező, két rúd között megcsúszás nélkül gördülő, véges tehetetlenségű tárcsa reprezentál [1]. A Verhás-elemet, és a Newton-elemet általában a rugalmas (nem képlékeny) állapot modellezésére használják.

St. Venant elemként is nevezik az ideális képlékenységi elemet, amelyet egy súrlódó lap képvisel. Csak akkor jön létre deformáció, ha az erő túllépi a két lap közötti súrlódási ellenállásból származó erőt. A St. Venant elem önmagában az ideálisan képlékeny test modellje. A dolgozatban a képlékeny

állapot vizsgálatára nem kerül sor, de az a St. Venant elem más elemekhez való kapcsolásával analizálható.

A bemutatott alapelemek soros vagy párhuzamos kapcsolása révén újabb modelleket kaphatunk, amelyek segítségével az anyagok viselkedése modellezhető. A szerkezeti anyagok, köztük a polimerek mechanikai viselkedésének vizsgálatával foglalkozó szakirodalomban nagyon lényeges célkitűzés a megfelelő anyagmodell kidolgozása, amely megfelelő pontossággal írja le az anyag mechanikai tulajdonságait. Az egyenleteket alkotó anyagi állandók számának növelése jellemzően növeli a közelítés pontosságát, de rontja az egyenletek gyakorlati használhatóságát. Fontos szempont, hogy az egyenletek ne tartalmazzanak túl sok meghatározandó anyagállandót [3]. Az 1. táblázatban az alapmodellek és néhány belőlük származtatott modell megnevezése és anyagegyenlete látható a feszültség- és deformációtenzor deviatorikus (torzulási) és gömbi (térfogatváltozási vagy szférikus) felosztásai szerint [4]. A felbontás részleteiben az A mellékletben található.

1. táblázat Anyagmodellek

Anyagmodell	Torzulási állapot anyagegyenlete	Térfogatváltozási állapot anyagegyenlete
Hooke-test	$\sigma^d = 2G\varepsilon^d$	$\sigma^o = 3K\varepsilon^o$
Newton-test	$\sigma^d = 2\eta\dot{\varepsilon}^d$	$\sigma^o = 3K_v\dot{\varepsilon}^o$
Verhás-test	$\sigma^d = \theta\ddot{\varepsilon}^d$	$\sigma^o = \theta_o\ddot{\varepsilon}^o$
Kelvin-test	$\sigma^d = 2G\varepsilon^d + 2\eta\dot{\varepsilon}^d$	$\sigma^o = 3K\varepsilon^o + 3K_v\dot{\varepsilon}^o$
Maxwell-test	$\sigma^d = 2G\varepsilon^d - \tau\dot{\sigma}^d$	$\sigma^o = 3K\varepsilon^o - \tau_o\dot{\sigma}^o$
Poynting- Thomson-test	$\sigma^d = 2G\varepsilon^d + 2\eta\dot{\varepsilon}^d - \tau\dot{\sigma}^d$	$\sigma^o = 3K\varepsilon^o + 3K_v\dot{\varepsilon}^o - \tau_o\dot{\sigma}^o$
Burgers-test	$\sigma^d = 2\eta\dot{\varepsilon}^d + \theta\ddot{\varepsilon}^d - \tau\dot{\sigma}^d - \xi\ddot{\sigma}^d$	$\sigma^o = 3K_v\dot{\varepsilon}^o + \theta_o\ddot{\varepsilon}^o - \tau_o\dot{\sigma}^o - \xi_o\ddot{\sigma}^o$
Tehetetlenségi Poynting- Thomson-test	$\sigma^d = 2G\varepsilon^d + 2\eta\dot{\varepsilon}^d + \theta\ddot{\varepsilon}^d - \tau\dot{\sigma}^d$	$\sigma^o = 3K\varepsilon^o + 3K_v\dot{\varepsilon}^o + \theta_o\ddot{\varepsilon}^o - \tau_o\dot{\sigma}^o$

Az összetett modellek jellemzően az alapelemek többfajta kapcsolása révén is előállíthatóak. A Poynting-Thomson modellt a szakirodalom sok esetben más névvel illeti, úgymint Zener-modell, vagy Standard Linear Solid (SLS) modell. A Tehetetlenségi Poynting-Thomson helyett a Kluitenberg-Verhás elnevezéssel is találkozhatunk [5].

Halász [6] szerint polimerek esetén a feszültségrelaxáció jól közelíthető nagyszámú Maxwell-test sorba kapcsolásával, míg a kúszás Kelvin-testek soros kapcsolásával. A kapott általánosított Maxwell- és Kelvin-modellek ekvivalensekké tehetők, így a különböző modellek alapegyenleteit tartalmazó általános lineáris viszkoelaszticitási összefüggés felírható [6].

$$a_0 \sigma + a_1 \frac{d\sigma}{dt} + a_2 \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \dots + a_n \frac{d^n\sigma}{dt^n} = b_0 \varepsilon + b_1 \frac{d\varepsilon}{dt} + b_2 \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + \dots + b_m \frac{d^m\varepsilon}{dt^m} \quad (1)$$

A szakirodalomban számos munkával találkozhatunk, amelyek a termoplasztikus (hőre lágyuló) műanyagok modellezésével kísérlik meg a viselkedésük leírását. A termoplasztikus anyagok kis megnyúlás hatására viszkoelasztikusak, míg nagy megnyúlás esetén viszkoplasztikusak [7]. Sok esetben találunk a szakirodalomban olyan modelleket, amelyeket fém alapú anyagmodellek módosításával állítottak elő. Ilyen modell a Haufe és munkatársai [8] által közölt SAMP modell, amely eredetileg ütközés-szimulációs célból született. Az utóbbi időben számos olyan anyagmodellel próbálták leírni a hőre lágyuló műanyagok viselkedését, amelyek a teljes feszültség felbontásával dolgoznak. A modellek jellemzően nagyon változatos paraméterszámmal dolgoznak, például Krempel és Ho [9] PA66 nylonra készített modellje 15 paramétert tartalmaz. Hasonló modellekkel találkozhatunk nagy sűrűségű polietilén (HDPE) [10], polioximetilén (POM) [11] és polipropilén (PP) [12] esetén is. Nikolov és Doghri [13] HDPE kis alakváltozása esetére alkalmazható micromechanikai alapú konstitutív modellt

ismertettek. Joseph [14] egy olyan modellt publikált, amely polimerek, köztük PVC, nemlineáris viszkoelasztikus válaszát írja le. Pagnacco és munkatársai [15] izotróp anyag rugalmassági és viszkoelaszticitási paramétereinek meghatározására hibrid numerikus-kísérleti megközelítést javasoltak, és a modell alkalmazhatóságát kemény PVC lemez példáján keresztül szemléltették. Yonan és munkatársai [7] egy 7 paramétert tartalmazó nemlineáris viszkoplasztikus anyagmodellt publikáltak PVC vizsgálatához.

Számos kutató tört rendű anyagmodellek segítségével vizsgálta a viszkoelasztikus anyagok viselkedését. Nonnenmacher és Glöckle [16] általánosították a Poynting-Thomson modellt tört rendű formában. Glöckle és Nonnenmacher [17] egy pontosan számítható tört rendű modellt publikáltak a lineáris viszkoelasztikus viselkedés leírására. Metzler és Nonnenmacher [18] frakcionális relaxációs folyamatokat vizsgáltak és tört rendű reológiai modelleket használtak a viszkoelasztikus anyagok leírására. Mainardi és Spada [19] egy átfogó áttekintést adtak az általános modellek tört rendű formáiról és azok alkalmazásáról. Liu és Xu [20] olyan konstitutív egyenletekkel dolgoztak, amelyek egyszerre tartalmaztak három különböző tört rendű paramétert is. Munkájukban egy viszkoelasztikus anyag esetében a kiszámított anyagi paraméterek értékeit is közölték.

A téma szakirodalma alapján egyértelmű, hogy a kellő pontosságú modellezéshez a paraméterek számának megválasztása kritikus fontossággal bír. Továbbá számos helyen hangsúlyozzák a terület kutatói, hogy a különböző anyagokhoz tartozó paraméterek meghatározása napjainkban egy aktuális és kiemelt figyelmet érdemlő kutatási terület. Legtöbb esetben a kúszás témakörére fókuszálnak a tudományos munkák [21-26], de a kísérleti vizsgálatok sok esetben a kúszás és a relaxációs fázis elemzését egyaránt magukba foglalják [12, 14, 27-30]. Műanyag szerkezeti elemek alkalmazása esetén a feszültség-relaxáció döntő fontosságú lehet [31].

2.1.2. Öregedés, öregítés

A műanyag termékek tulajdonságai használatuk során változásokon mennek keresztül, amelyek fizikai és kémiai folyamatok eredményei. Ezeket összefoglaló néven öregedésnek nevezzük [32]. Az öregedés mértéke és sebessége egyrészt az anyag sajátosságaitól, másrészt az igénybevétel körülményeitől függ (terhelés, hőmérséklet, környezeti tényezők, stb.) [33]. Az öregedést okozó változás eredete szerint lehet független a körülvevő környezettől, és lehet a környezettel való kölcsönhatás eredményeként létrejövő. Számos esetben több öregedést kiváltó jelenség egyszerre és interaktív módon jelentkezik [34].

Az öregedés csoportosítása során jellemzően két nagy csoportot szokás megkülönböztetni, úgymint fizikai öregedés és a kémiai öregedés (kémiai degradáció).

Fizikai öregedés

Az öregedések legáltalánosabb formája a fizikai öregedés. Akkor jelentkezik, amikor egy polimer nem-egyensúlyi állapotban van, és ezért az molekuláris relaxációk révén egyensúlyhoz közelebbi állapotra törekszik. Ez a jelenség nagyon gyakori hőre lágyuló polimerek esetén, amelyeket feldolgozásuk során magas hőmérsékletről gyorsan hűtenek le. Amorf polimerek esetén a gyors lehűlés az üvegesedési hőmérséklet (T_g) alatt is folytatódik és ekkor a molekuláris relaxáció sebessége túl lassú ahhoz, hogy lépést tartson a termodinamikai egyensúlyhoz szükséges változásokkal [34]. Ennek eredményeképpen az anyag úgy éri el környezetével a hőmérsékleti egyensúlyt, hogy nincs termodinamikai egyensúlyban [35]. Ezért az idő

előrehaladtával öregedési folyamatokon megy keresztül az anyag, a termodinamikai egyensúlyhoz való közeledés, relaxáció révén.

Kémiai öregedés (degradáció)

Kémiai szerkezetváltozással járó jelenség, amely különböző módon és különböző hatások eredményeképpen mehet végbe. Számos tényező okozhatja egy polimer kémiai degradációját, melyek közül az alábbiakat lehet kiemelni [33]:

- Termikus degradáció,
- Termooxidatív degradáció,
- Fotodegradáció,
- Nagyenergiájú sugárzás által kiváltott kémiai öregedés,
- Mechanikai degradáció.

A polimerek *termikus degradációja* egy alaposan tanulmányozott területe a polimer-tudományoknak, számos kapcsolódó kutatással és publikációval. Nemcsak akkor van jelentősége, ha a termék használata során magas hőmérsékletnek lesz kitéve, mert sok esetben a polimerek már feldolgozásuk során ki vannak téve magas hőmérséklet hatásának. A magas termikus energia fog ez esetben kémiai változásokat indukálni az anyag szerkezetében.

Ha a magas hőmérséklet egy agresszív kémiai anyag jelenlétével párosul, akkor felgyorsulhatnak olyan reakciók, amelyek környezeti hőmérsékleten csak lassan, vagy egyáltalán nem mennének végbe [34]. Az agresszív kémiai anyag leggyakrabban az oxigén és ebben az esetben *termooxidatív degradációról* beszélünk.

Fény hatására az anyagban számos degradációs folyamat játszódhat le, melyeket összefoglaló néven *fotodegradációnak* nevezzük. Különösen a nagy energiájú UV fénynek lehet jelentős hatása, amely lényeges

tulajdonságváltozáshoz vezethet. Az UV fény hatására bekövetkező tulajdonságváltozások az értekezés későbbi részében részletesebb ismertetésre kerülnek.

Nagyenergiájú sugárzás által kiváltott degradáció jellemzően az atomtechnika használata közben jelentkezik. Általánosságban a műanyagok jóval érzékenyebbek ezen degradáció típussal szemben, mint a fémek és a kerámiák [33].

A külső feszültségek hatására az anyagban sok esetben kémia kötések szakadnak fel, ezt a jelenséget összefoglaló néven *mechanikai degradációnak* nevezzük. A kötésszakadások által létrejött szabad gyökök további gyökös reakciót válthatnak ki [33].

Öregedés időjárás hatására (weathering)

A szakirodalomban a polimerek időjárás hatására bekövetkező tulajdonságváltozásait sok esetben illetik a „természetes öregedés” megnevezéssel is. Számos tényező játszhat szerepet a szabadban lévő polimerek öregedésében, úgymint a nap UV sugárzása, a víz és szennyezőanyagok gáz formában vagy sok esetben savas eső alakjában való jelenléte, a magas hőmérséklet és a hőmérsékleti szélsőségek [34]. A tényezők közül a legtöbb esetben az UV sugárzás hatására bekövetkező degradáció a legjelentősebb, ennek megfelelően a laboratóriumi vizsgálatok is sok esetben erre fókuszálnak.

Öregítés

A mesterséges körülmények között, sok esetben laboratóriumi kutatások céljából végzett gyorsított öregedési vizsgálatokat összefoglaló néven mesterséges öregítésnek nevezi a szakirodalom. A polimerek

tulajdonságváltozásainak befolyásolására számos lehetőség van, például a hőmérséklet [36-38], a mechanikai terhelés [39] vagy az UV sugárzás változtatása [40-47]. Több kutatás kifejezetten a különböző polimerek biodegradációjának vizsgálatára irányul [48, 49]. Mesterséges öregítések kísérleti körülményeinek megválasztásánál fontos szempont lehet, hogy az öregítési mechanizmusok közel azonosak legyenek a természetes öregedés folyamataival [35].

PVC öregedése

A PVC degradációja jellemzően termikus, fotolitikus illetve termooxidatív hatások eredményeképpen következik be [50]. A PVC öregedését befolyásoló tényezők közül az oxigén, a páratartalom, a mechanikai terhelés, az agresszív közeg és az ionizáló sugárzás a legfontosabbak, amelyek hatását gyorsítja a hőmérséklet emelkedése [51]. A degradáció elkülöníthető elsődleges és másodlagos folyamatokra. Elsődleges folyamat az úgynevezett cipzár effektus, amely a PVC-lánc HCl eliminációját foglalja magába és eredményeképpen a PVC láncokon poliének képződése figyelhető meg [52]. Jellemzően rövid polién szekvenciák keletkeznek, 2-25 kettős kötés számmal, vagyis a HCl-elimináció nem játszódik le a lánc teljes hosszában. A polimer színváltozása figyelhető meg 7 kettős kötéstől kezdődően: először sárgulás, majd további degradációs esetén barnás és feketés elszíneződés jelentkezik [52]. Ezt másodlagos reakciók követik, úgymint a láncszakadás, a polimer térhálósodása vagy aromás vegyületek képződése [50].

A PVC számos előnyös tulajdonságának köszönhetően, úgymint az alacsony előállítási költség, a hosszú távú stabilitás és a kontrolálható mechanikai tulajdonságok [53], még mindig az egyik legfontosabb, világszerte gyártott műanyag. Az egyik leglényegesebb probléma a PVC-vel kapcsolatban

az időjárással szembeni ellenállósága, különös tekintettel az UV sugárzás káros hatására [54]. Ennek megfelelően a PVC természetes és mesterséges körülmények közötti öregedésével számos publikáció foglalkozik a szakirodalomban. A vizsgálatok jellemzően a foto-oxidációs [55-60] illetve a termikus hatások [53, 61-67] értékelésére fókuszálnak, sok esetben az időjárás okozta hatások [51, 68] pontos modellezésére való törekvéssel együtt.

Általánosságban elmondható, hogy az UV öregítés hatására oxidatív reakciók sorozata következik be, amely láncszakadással és térhálósodással egyaránt jár, ezáltal az anyag elridegedéséhez vezetnek. Ezen folyamatokhoz oxigénre van szükség, ami az anyag felszínéről diffundál, így a degradáció legnagyobb része az anyag felületéhez közeli, viszonylag vékony területre koncentrálódik [34].

A degradáció szintjét általában mechanikai paraméterek segítségével jellemzik, úgymint a szakadási nyúlás, a szakítószilárdság, stb. [38, 40, 45, 53, 60, 61, 65, 69, 70]. Ezek alkalmasak a vizsgált anyag tulajdonság változásainak jellemzésére, de szemben a később részletezett rezgésdiagnosztikai technikákkal, nem roncsolásmentes módon szolgáltatnak információt. A PVC termékek öregedésével kapcsolatos vizsgálatok közül az értekezés későbbi fejezeteihez illeszkedően a PVC csövek degradációs folyamatainak vizsgálata [71-75] kiemelkedően fontos, amely szintén jelentős területét képezi a szakirodalmi vizsgálatoknak.

2.2. Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok

Napjainkra a különböző rezgésdiagnosztikai technikák alkalmazása számos, rendkívül változatos területen terjedt el. Ennek megfelelően a szakirodalmi háttér jelentős mértékben kiszélesedett. Jelen értekezésben a

rezgésdiagnosztikai vizsgálatok szakirodalmi áttekintése a később részletesen tárgyalt szálak és csövek rezgésével kapcsolatos tudnivalókra fókuszál.

Szálak rezgésdiagnosztikai vizsgálata

A szálak síkbeli rezgőmozgásával, amelyet egyszerű matematikai modell segítségével írhatunk le, számos korábbi szakirodalmi munka foglalkozik. Szálak rezgését vizsgálhatjuk pontban ható, vagy megoszló terhelés alkalmazásával, valamint más módszerek segítségével is, úgymint feszültségváltozás különféle peremfeltételekkel. Belotserkovskii [76] koncentrált tömeggel terhelt szál tranziens transzverzális rezgését vizsgálta. Límaco és munkatársai [77] inhomogén rugalmas húr rezgését vizsgálta. Alsahlani és Mukherjee [78] szálak rezgését vizsgálta akadályba történő ütközés esetén, amikor is az akadály az egyik végnél jelentkezik. A húr rezgésének szabályozása és csillapítása szintén kiemelt kérdéskör, amelynek értékelésével és matematikai leírásával számos tanulmány foglalkozik [79-82].

A húrrezgés vizsgálatok gyakran hangszerekhez kapcsolódnak: Malashin [83] zenei, tekercselt húrok esetén vizsgálta a hullámok és rezgések interakcióját. Stulov és Kartofelev [84] zongora húrjának rezgését szimulálta és analizálta. A szál egy fölötte elhelyezkedő kápó révén végződött. Zhu és Zeng [85] változó hosszúságú és állandó feszültségű húr pontos válaszát határozta meg. Egy másik munkában a húrrezgés szabályozását mutatják be a szerzők egy pontban megvalósított megfogás alkalmazásával és feloldásával [81].

Kevesebb szakirodalmi publikáció foglalkozik az öregedés rezgéstulajdonságra gyakorolt hatásaival. Ilyen például Noguchi és munkatársai [86] munkája, amelyben az öregedett fa rezgéstulajdonságait hasonlították frissen vágottakéhoz. Az értekezés későbbi részében a szálak

rezgésparamétereiben öregítés hatására bekövetkező változások kiemelt szerepet kaptak.

Csővek rezgésdiagnosztikai vizsgálata

A csővezetékek az ipari rendszerek fontos elemei, és meghibásodásuk sok esetben jelentős anyagi és környezeti kárral jár. Az összes meghibásodás jelentős része (>30%) a csővezetékek sérülésére, meghibásodására vezethető vissza [87], ennek megfelelően a terület egyre nagyobb figyelmet kap. Különböző statisztikai, mérési és számítási eljárások jelentek meg a szakirodalomban, amelyek célja a csővezetékek szivárgásának és törésének meghatározása, azok előrejelzése [88-90].

Rezgés alapú diagnosztikai tesztek gyakran alkalmaznak anyagok és szerkezetek állapotának és meghibásodásának értékeléséhez. Az állapotfelmérésre és hibakeresésre alkalmas módszer az impulzusgerjesztés (impulse excitation of vibration, IEV), amely során a rezgésgerjesztés egy ütésszerű impulzus révén valósul meg. A gerjesztést követően a rezonanciafrekvenciák méréseiből nyert információk használhatóak fel különböző célokra, mint például a dinamikus Young és a nyírási modulus meghatározására [91]. A gerjesztés nem kizárólag impulzus kalapáccsal valósítható meg, található olyan szakirodalmi példa, ahol lézeres ablációval történt a gerjesztés, amely lehetővé tette a tízezer kilohertzes nagyságrendű részek vizsgálatát [92]. Ez az eljárás azért is különösen alkalmas magas frekvenciatartomány vizsgálatára, mert nem igényli a gerjesztő erő mérését. Szintén előnyös tulajdonsága a lézersugárral történő gerjesztésnek, hogy közvetlen érintkezés nélküli módon lehetséges a szélessávú vizsgálat jól szabályozható forrás alkalmazásával, amelynek eredményeképpen különböző hullámtípusok egyidejű előállítására nyílik lehetőség [93]. Szintén széles

körben alkalmazott a repülési idő (time of flight, TOF) technika, amely alkalmazható például a csőfal elvékonyodásának megjelenítésére [94].

A sajátfrekvenciák meghatározása csővezeték rendszerek vizsgálata esetén is sok esetben képezik a kiértékelés alapját [95-98]. Korábbi munkák folyadékszállító csővezetékeket vizsgáltak transzfer-mátrix módszerrel és meghatározták a rendszer saját frekvenciáit [99, 100]. Laboratóriumi körülmények között is végeztek modellkísérleteket csővezeték rendszerek vizsgálatára, amely esetekben a sajátfrekvenciák értékelése szintén kiemelt fontosságú volt [101]. Szakirodalmi munkák alapján a rendszerek merevségének változása kimutatható a kísérletileg meghatározott sajátfrekvencia értékekben [102]. Az értekezés későbbi fejezetében tárgyalt csövek rezgésdiagnosztikai vizsgálatát magába foglaló kísérleti rész kiértékelésében ennek vizsgálata is szerepet kap.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

3.1. Mesterségesen öregített lágy PVC kúszás és relaxációs vizsgálata

Kutatócsoportunkkal komplex kúszás és relaxációs kísérletsorozatot folytattunk lágy PVC anyagtulajdonságainak jobb megismerése és viselkedésének pontosabb követése érdekében. A próbatest sorozatok különböző időtartamú mesterséges öregítésen mentek keresztül, amelynek anyagi jellemzőkre gyakorolt hatásait kívántuk vizsgálni.

3.1.1. Vizsgált anyag

A lágyító anyagtartalom jelentős hatása a PVC reológiai tulajdonságaira közismert [103, 104]. A hosszú idejű kúszás-relaxációs kísérletekhez megközelítőleg 8 mm átmérőjű PVC szálakat használtunk, amelyek BorschodChem NyRt. gyártású, LE-411/009 típusú lágy PVC granulátumból extrudálással készültek. Összetétele a 2. táblázatban, míg néhány mechanikai tulajdonsága a 3. táblázatban látható

2. táblázat LE-411/009 lágy PVC granulátum összetétele (tömeg %)

S-5070 PVC por (K=70)	60,30%
di(2-etilhexil) ftalát (DOP)	37,39%
TM181-FSM szerves ón stabilizátor	0,90%
MMA/EA feldolgozás-javító	1,21%
E-viasz	0,18%
Uvitex OB optikai fehérítő	0,02%

3. táblázat LE-411/009 lágy PVC mechanikai tulajdonságai

Shore A keménység	72
Sűrűség	1,217 g/cm ³
Húzószilárdság	18,1 MPa
Szakadási nyúlás	340 %

3.1.2. Felhasznált eszközök

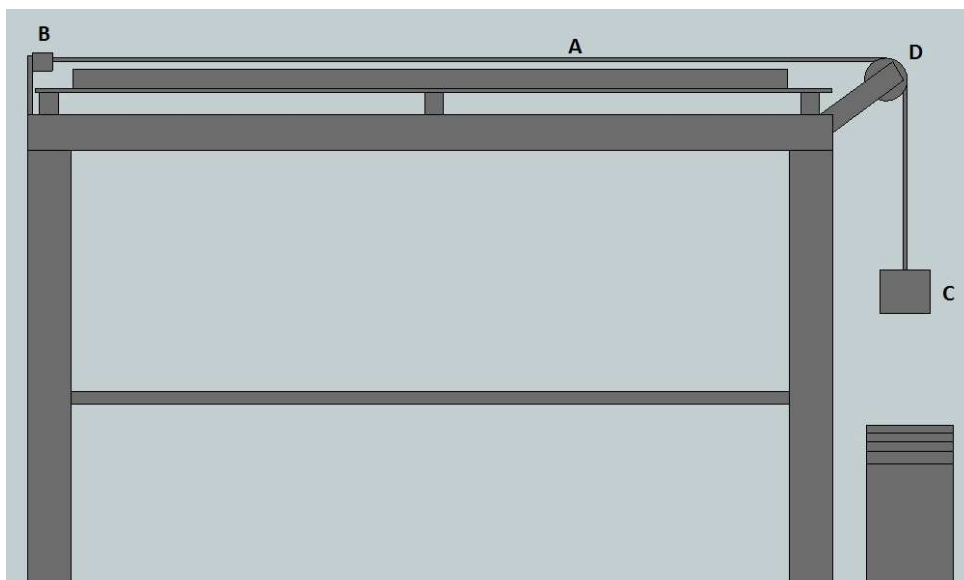
A szálak mesterséges öregítését UV fény segítségével végeztük el. Ehhez két darab Sylvania Ultraviolet G30W-os UV fényforrást használtunk. A fényforrások UV sugárzásának csúcserkéhez tartozó hullámhossz 253,7 nm. A próbatestek a lámpáktól 25 cm távolságban helyezkedtek el, itt az intenzitás értéke megközelítőleg $2 \cdot 1720 \text{ mW/cm}^2$ volt. A vizsgálatokat öregítetlen és különböző ideig öregített szálakon egyaránt elvégeztük, minden állapothoz tartozóan 3-3 próbatestet vizsgáltunk. Két különböző hosszúságú öregítési sorozathoz 2541 és 4000 óra öregítési idő tartozott. Az anyag degradációjához kapcsolódó kiegészítő vizsgálat eredményei a B mellékletben láthatóak.

A mérésekhez használtuk továbbá egy Rinstrum N320 típusú erőmérő cellát (kapacitása: 5000 N). A hossz- és keresztirányú alakváltozások mérését egy digitális tolómérő és egy mikrométer segítségével végeztük el.

3.1.3. A kísérletsorozat technikai megvalósítása

A kísérlet során a szálakat egy asztal fölött húztuk ki, egyik végét fixen befogtuk az erőmérő-cellához. A másik végét átvezettük egy csiga fölött és ráakasztott testtel, 50 N erővel terheltük a kísérlet megindításakor. A hőmérséklet nagyon fontos tényező, mivel a termoplasztikus anyagok viselkedését jelentősen befolyásolja [105]. A tesztek során a hőmérséklet végig

295,65 $\pm$ 0,5 K volt. A próbatestek 250 mm hosszú szakaszát vizsgáltuk. A szálakon jelölést végeztünk, és a kiindulási értékek rögzítése után meghatározott időpontokban mértük a próbatesteken a jelváltozást a hosszirányú deformáció meghatározásához, valamint mikrométerrel a keresztirányú deformáció meghatározásához az átmérő értékét. A terhelés minden esetben azonos volt és a jellegéből fakadóan végtelen gyors felterhelésnek tekinthető. A kísérleti rendszer vázlatos képe az 1. ábrán, míg a 2. ábrán a rendszerről készült fényképek láthatóak.



1. ábra A kísérleti rendszer vázlatos képe

A: kifeszített PVC szál; B: erőmérő cella; C: próbatestre akasztott test; D: csiga



2. ábra Képek a kísérleti rendszerről

A terhelést követően a tömeggel terhelt vég vertikálisan lefelé mozdult. A kísérleteink során minden esetben három és fél óra kúszást követően elemek test alá helyezésével „felültettük” a próbatest tömeggel terhelt végét, ezzel befagyasztva a további hosszirányú alakváltozást. Ekkor az erőmérő cella által mért értékek illetve a hossz- és keresztirányú deformáció adatai alapján vizsgáltuk a relaxációs szakaszt. Végül tehermentesítés után levettük a próbatesteket és nyugalmi állapotban különböző időpontokban ismételten mértük a hossz- illetve keresztirányú deformációt. A kísérletünk során több szakaszt különíthettünk el, amelyek a 4. táblázatban láthatóak.

4. táblázat A kísérlet szakaszai

	Szakasz	Jellemző
1.	Terhelés	végtelen gyors ($\dot{\epsilon}_{\parallel} \rightarrow \infty$)
2.	Kúszás	3,5 óra
3.	Relaxáció	min. 70 max. 430 óra ($\dot{\epsilon}_{\parallel} \rightarrow 0$)
4.	Tehermentesítés	próbatest levétele ($\epsilon_{\parallel} \rightarrow -\infty$)
5.	Rugalmas utóhatás	levétel után ($\sigma = \dot{\sigma} = 0$)

Ezen kísérletsorozattal a cél annak a vizsgálata, hogy milyen módszerrel tudjuk megfelelő pontossággal leírni az általunk vizsgált anyag viselkedését a bemutatott terhelés hatására, valamint hogy információt nyerjünk az alkalmazott modell segítségével az öregedés folyamatáról. Az értékelésnél minél kevesebb anyagi paraméter alkalmazására törekedtünk, amelyekben a végbemenő változásokkal az anyag degradációjának állapotáról kívántunk információt nyerni.

3.2. PVC szálak rezgőhúrként történő vizsgálata mesterséges öregítéssel

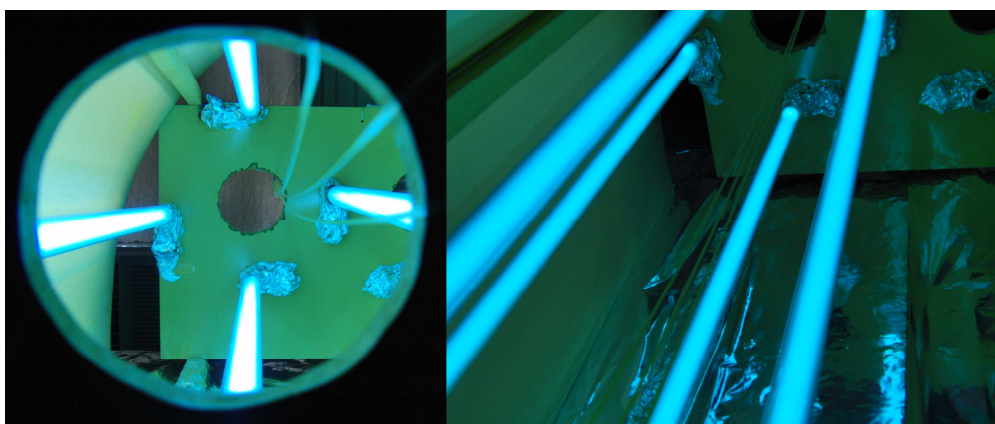
Ezen kísérletsorozatban a vizsgált szálakban öregítés hatására bekövetkező tulajdonság-változásokat kívántuk vizsgálni rezgésdiagnosztikai eszközökkel. A lágy PVC szálakkal folytatott kísérletek során különböző öregítési idő után rezgőhúrként vizsgáltuk a próbatesteket. A következőkben ismertetésre kerül a kialakított kísérleti rendszer, és az eredmények értékelésénél a meghatározott paraméterértékek és azok változásai. Alapvető célkitűzés volt, hogy speciális rezgésdiagnosztikai módon vizsgáljuk az intenzív öregítés következtében bekövetkező tulajdonságváltozásokat.

3.2.1. Vizsgált anyag

A kísérletsorozat során a már korábban, a 4.1-es fejezetben bemutatott LE-411/009 típusú lágy PVC granulátumból extrudálással készült próbatesteket használtunk. Az anyagi összetétel és a mechanikai tulajdonságok a 2. és a 3. táblázatban szerepeltek. A különbség a korábbi kísérletsorozathoz képest, hogy a rezgőhúrként történő vizsgálatokhoz kisebb átmérőjű szálakat alkalmaztunk. Ebben az esetben megközelítőleg 2 mm-es átmérőjű szálakból készültek el a próbatestek.

3.2.2. Felhasznált eszközök

Az mesterséges öregítéshez ebben az esetben is a 4.2-es fejezetben ismertetett Sylvania Ultraviolet G30W fényforrást használtunk fel. Egyidejűleg négy ilyen fényforrást alkalmaztunk az általunk épített öregítő kamrában. Az öregítő kamra és a benne elhelyezkedő szálak szemléltetésére szolgál a 3. ábra.



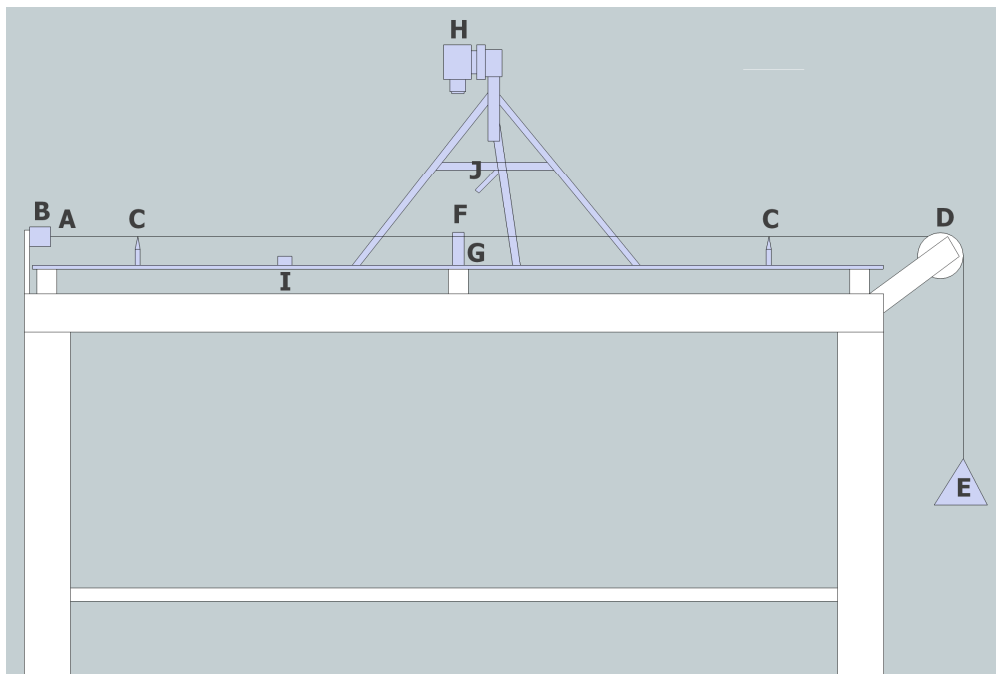
3. ábra Az öregítő kamra egy öregítési sorozathoz tartozó három PVC szállal

A kísérletsorozatot egy általunk készített rezgőasztalon végeztük, amelyen a rezgésmérésekhez egy PCB 356A24/NC típusú triaxiális gyorsulásmérőt, és zajméréshez egy G.T.A.S. 46AF típusú mikrofont használtunk. Ezek mindegyikét egy Sinus Soundbook MK2_8LE 8 csatornás mérőrendszerhez csatlakoztattuk, amelyen Samurai (SINUS Messtechnik GmbH) univerzális szoftvercsomag segítségével végeztük el az adatok rögzítését és későbbi kiértékelését. A kísérletekről videofelvételt készítettünk egy Casio Exilim EX-FH 25 fényképező készülékkel, és a rögzített felvételeket Photron FASTCAM Viewer szoftver segítségével dolgoztuk fel. A mérések során használtunk továbbá egy Rinstrum N320 típusú erőmérőcellát is.

3.2.3. A kísérletsorozat technikai megvalósítása

A szálakat a mérésekhez egymást követően egyesével húrként kifeszítettük a rezgőasztalra a 4. ábrán látható módon. Az azonos hosszúságú próbatestek egyik végét (a 4. ábrán A-val jelölt) fixen rögzítettük az erőmérőcellához (B). A szálakat két prizmán (C), majd egy csigán (D) átvezetve a másik végére helyeztünk 821,16 g tömegű testtel terheltük. A vizsgálat tárgyát képező két prizma közötti szakasz hossza 800 mm volt. Ennek a szakasznak a középpontjától történt a szálak kitérítése minden esetben azonos irányban 100 mm értékkel (F). A rezgőasztal felületére egy milliméter skálát (G) helyeztünk a videofelvételek kiértékelésének megkönnyítésére. A felvételt a fényképezőgép (H) készítette felülnézetből. Elhelyeztünk továbbá egy rezgés gyorsulásmérőt (I) az asztal felületére, valamint egy mikrofon (J) hangfelvételt készített a kísérletek során. A kitérített szálakat megpendítettük, és a csillapodó rezgőmozgásról 240 fps (frame per second) beállítás mellett készítettük a videofelvételt, valamint rögzítettük a hang és rezgésparaméter értékeket. A kísérleti rendszer sematikus vázlata látható a 4. ábrán. Hasonló kísérleti

rendszer alkalmazására található szakirodalmi példa, ahol sűrűség mérések céljából végeztek méréseket kifeszített szálakon [106].



4. ábra A kísérleti rendszer oldalnézetben

A kísérleteink során öregítetlen és öregített PVC szálakból készült próbatesteket egyaránt vizsgáltunk. Összesen négy csoportot képeztünk: öregítetlen, 200, 1000 illetve 2200 óráig öregített szálak. Minden csoport esetében három-három próbatesten végeztük el a méréseket.

A mérési eredményekből a pendítést követő első 10 kitérés értékét határoztuk meg a videofelvétel segítségével. A maximális értékeket a felvétel képkockáinként történő léptetésével, a szálak alatt elhelyezkedő milliméter skála segítségével állapítottuk meg. A húr egyirányú kilengését tekintettük kitérésnek, vagyis egy periódus két ilyen kitérést foglal magába.

A kísérletsorozat révén a csillapodó rezgést leíró paraméterértékek meghatározásával és értékeinek változásával céloztuk meg a szálak tulajdonságváltozásainak vizsgálatát.

3.3. Csövek tönkremenetelének vizsgálata rezgésdiagnosztikai eszközökkel

A csövek tönkremenetelének egyik gyakori oka a belső falukra történő lerakódások következtében bekövetkező átmérő szűkülés. Ezen kísérletsorozat során a belső átmérő csökkenésének modellezését valósítottuk meg és a különböző csőállapotokhoz tartozóan rezgésdiagnosztikai vizsgálatokat végeztünk. Célunk a cső állapotának roncsolásmentes módon történő felmérése volt rezgésparaméterek segítségével.

3.3.1. Vizsgált anyag

Vizsgálatainkat egy 89 mm külső átmérőjű, 2 mm falvastagságú rozsdamentes acélcsövön végeztük el. (Aquaplus Kft. által használt csőtípus, Heat N 0416950 EN 1.4541 TP 321 EN 10217-7 TC1 W1 CR, 88,9*2,0 mm, gyártási idő: 2009.07.14, hegesztett rozsdamentes acélcső). Választásunk azért esett erre a csőre, mert ilyen méret paraméterekkel rendelkező csőszakaszban végbemenő vízkőlerakódás okozott rendszeresen problémát több magyarországi város (Zalaegerszeg, Kistelek) geotermikus rendszerének esetében. Az általunk vizsgált cső teljes hossza 1115 mm volt.

A kísérletsorozatot megismételtük PVC alapanyagú csövön is (Pipelife Hungária Kft. gyártmányú, KM PVC-U nyomócső, SDR 33 PN6, 90*2,8 mm, extrudált cső), amelynek esetében szintén előfordul lerakódások

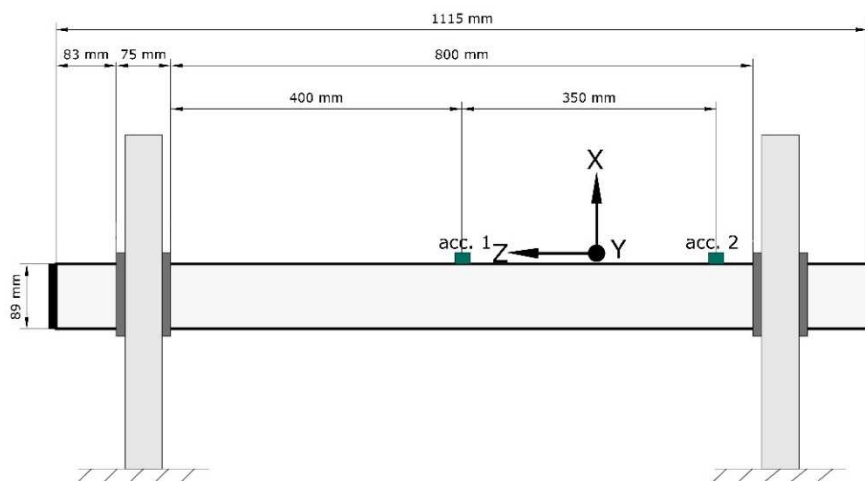
következtében történő belső átmérő csökkenés. A vizsgált PVC cső hossza megegyezett a rozsdamentes acélcső hosszával.

3.3.2. *Felhasznált eszközök*

A mérésekhez két triaxiális érzékelőt (PCB 356A02) csatlakoztattunk egy Sinus Soundbook MK2_8LE 8 csatornás mérőrendszerhez, amelyen Samurai (SINUS Messtechnik GmbH) univerzális szoftvercsomag segítségével végeztük el az adatok rögzítését és kiértékelését. A kísérletsorozathoz használtuk továbbá egy saját készítésű frekvenciagenerátort, illetve a méréseket egy E400 típusú esztergapadon végeztük. A csövek belső felületére történő anyagfelvitelt egy MVE 280M típusú esztergapadon történő forgatás során valósítottuk meg.

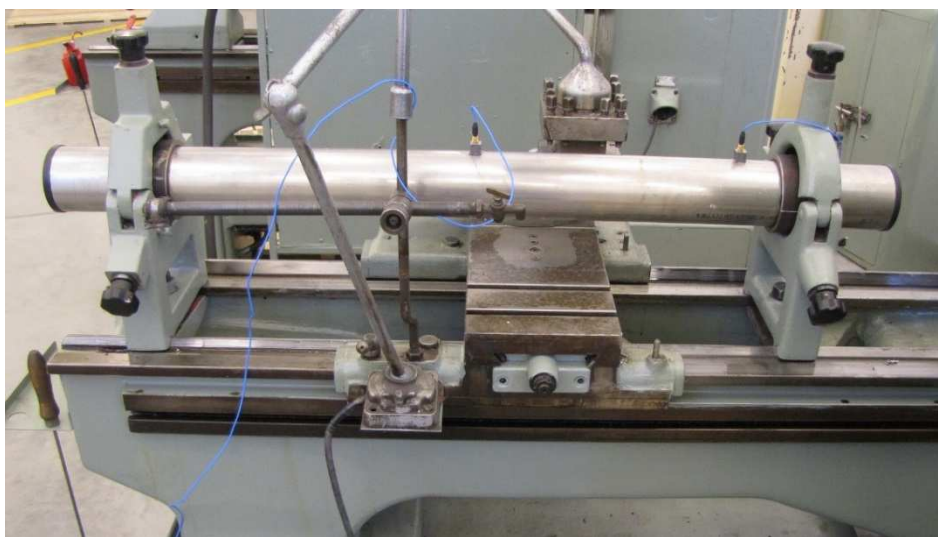
3.3.3. *A kísérletsorozat technikai megvalósítása*

A csövet a mérésekhez az esztergapadon bábok segítségével fogtuk meg. A befogásokhoz hosszirányban felhasított acélcső darabokat, illetve alájuk helyezett 3 mm vastagságú gumilapokat használtunk, a bábok ezeken keresztül fogták meg a csövet. A befogások közötti csőszakasz hossza 800 mm. A befogott cső vázlata az 5. ábrán látható.



5. ábra A mérési rendszer vázlata

A rezgésdiagnosztikai mérésekhez 2 db triaxiális rezgésérzékelőt ragasztottunk a csőre az 5. ábrán látható elrendezés szerint. Az egyik érzékelő a 800 mm-es szakasz közepén került elhelyezésre el (acc. 1), míg a másik (acc. 2) az egyik befogáshoz közel (érzékelők távolsága 350 mm).



6. ábra A csőszakasz megfogása és a rezgésérzékelők elhelyezkedése (rozsdamentes acélcső)

A 6. ábrán látható módon rögzített csövön több helyen és több különböző irányból jelentkező impulzusgerjesztés mellett végeztük el a méréseket. Az impulzusgerjesztést mind kalapáccsal, mind meghatározott magasságból (0,5 m) ejtett golflabdával ($m=45,81$ g) valósítottuk meg. Emellett olyan vizsgálatokra is sor került, ahol a középen lévő triaxiális érzékelő alatt szemből, egy frekvenciagenerátor segítségével 50 Hz frekvenciájú gerjesztést alkalmaztunk.

Az alapállapot mérése után cementesztrich réteg felvitelével szimuláltuk a belső átmérő csökkenését, amelyért felelős lehet például a csőfalon jelentkező vízkőképződés. A cementesztrich rétegek felvitele több lépésben történt, mindig újabb betonréteget kialakítva a csövön. A cementesztrichet a csőbe öntöttük, ezután megközelítőleg 1 órára esztergapadba fogva forgattuk. Onnan a csövet levéve a belső falára kirakódott réteget kötni hagytuk. A betonozáshoz a csövek végére helyeztül el az erre a célra kialakított műanyag dugókat, amelyek a mérések során végig a csőben voltak. A három betonozási szakaszhoz kapcsolódó átmérőváltozásokat és az esztergapadon alkalmazott forgási sebességeket tartalmazza az 5. táblázat.

5. táblázat Betonozás következtében csökkenő belső átmérő értékek és a réteg képzése során alkalmazott fordulatszám

Réteggépzési szakasz	Új belső átmérő megközelítő értéke [mm]		Forgatási sebesség [1/min]	
	Acélcső	PVC cső	Acélcső	PVC cső
Cementesztrich 1	65	48	75	380
Cementesztrich 2	50	38	150	380
Cementesztrich 3	40	34	240	380

Az egyszerű megvalósíthatóság mellett az is a cementesztrich alkalmazásával történő modellezés mellett szólt, hogy a vízkő is sok esetben hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, mint a cementesztrich. A rozsdamentes acélcső sajátfrekvenciájának számításához használt sűrűség értékek a két anyag esetén egymást részben átfedő tartományokat adnak. A betonréteg nem szabályos kör keresztmetszetű belső átmérőt hagy maga után, amelyet szintén sok esetben tapasztalhattunk vízkőképződés során. A fordulatszámokat a kísérlet során azért emeltük, hogy simább felületű cementesztrich réteget kapjunk. A 7. ábrán látható a rozsdamentes acélcső forgatás közben és az első réteg felvitelének eredménye.



7. ábra A rozsdamentes acélcső az esztergapadon történő forgatás közben, valamint az első cementesztrich réteg felvitele utáni állapotban

4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

4.1. Mesterségesen öregített lágy PVC kúszás és relaxációs vizsgálata

Vizsgálatainkat a deviatorikus (torzulási) és gömbi (térfogati) felbontás szerint végeztük, melyet az utóbbi időben számos kutató alkalmazott [7, 107, 108]. A feszültség és az alakváltozás tenzorok felbontása az A mellékletben látható. Asszonyi és munkatársai [5] egy olyan általános anyagegyenletet vezettek be, amely egy Poynting-Thomson test mellett egy további tehetetlenségi elemet is tartalmaz. A szerzők a kapott modellt Kluitenberg-Verhás testnek nevezték, amelyet felbontás után a következőképpen írhatunk fel:

$$\sigma^d + \tau^d \dot{\sigma}^d = \alpha^d \epsilon^d + \beta^d \dot{\epsilon}^d + \gamma^d \ddot{\epsilon}^d \quad (2)$$

$$\sigma^s + \tau^s \dot{\sigma}^s = \alpha^s \epsilon^s + \beta^s \dot{\epsilon}^s + \gamma^s \ddot{\epsilon}^s \quad (3)$$

Látható, hogy ebben az esetben a feszültség első deriváltjái, valamint az alakváltozás második deriváltjai bezáróan szerepelnek tagok az egyenletben. Vizsgálataink során megvizsgáltuk, hogy megfelelő számú paramétert tartalmaz-e a felírt egyenlet az általunk vizsgált anyag kúszás és relaxációs viselkedésének jellemzésére. A vizsgálatainkat a deviatorikus rész alkalmazásával végeztük el, külön kezelve a kúszás és relaxációs szakaszokat. Mindegyik esetben a deriváltak értékeit illesztett görbékből állítottuk elő, és a paraméterek értékei pedig lineáris illesztés eredményeiként adódtak.

4.1.1. Kúszás

A jellegéből adódóan végtelen gyorsnak tekinthető felterhelés után a próbatestek kúszása három és fél órán keresztül tartott. A kúszási szakasz a szálak tömeggel terhelt vége alá helyezett elemek alkalmazásával, az úgynevezett felültetéssel ért véget. A deviatorikus feszültség (σ^d) értékeit a kísérleti idő függvényében, a korábban ismertetett felbontás alapján számítottuk. Ezután a kapott mérési pontokra görbét illesztettünk a következő egyenlet segítségével:

$$y = y_0 + A_1 e^{\frac{-x}{t_1}} \quad (4)$$

Ebben az egytengelyű kísérletsorozatban a próbatestek hosszú idejű nyúlásnak voltak kitéve, és a feszültség értékeit kiszámítottuk az idő függvényében. A megkapott feszültség és a hozzátartozó kísérleti idő által meghatározott pontokra alkalmazható a Prony sorozatok képlete [109]:

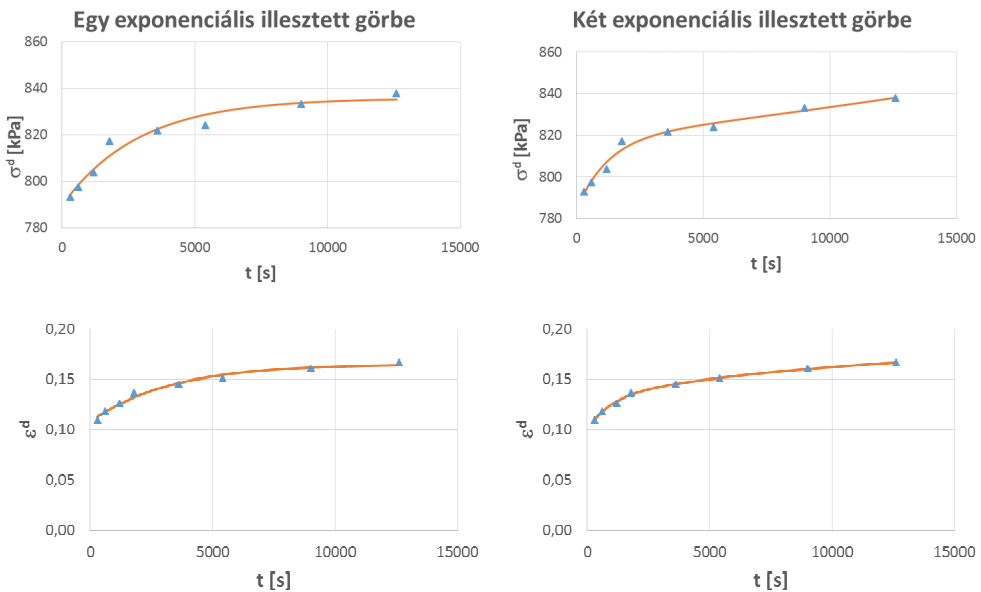
$$\sigma^d(t) = \sigma_\infty^d + \sum_{i=1}^n \sigma_i^d e^{\frac{-t}{\tau_i}} \quad (5)$$

Ahol σ_∞^d a hosszú távú modulus, τ_i a relaxációs idők. Az adatpontokra az egyenlet segítségével történt az illesztés. A megfelelő illesztéshez szükséges paraméterszám meghatározása nagy jelentőségű. Vizsgálataink során az $i=1$ értéket használtuk a kúszásra vonatkozóan. A megkapott görbékéből számítottuk a feszültség deriváltjainak értékeit.

Ugyanezt az eljárást alkalmaztuk a deviatorikus alakváltozás (ϵ^d) értékeinek és deriváltjainak meghatározásához.

$$\varepsilon^d(t) = \varepsilon_\infty^d + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^d e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (6)$$

Ahol ε_∞^d a hosszú távú modulus, τ_i a relaxációs idők. Megjegyzendő, hogy ebben az esetben is $i=1$ értéket használtunk, egy exponenciális görbe megfelelő illesztést biztosított. Az illesztés szemléltetése látható egy próbatest példáján keresztül a 8. ábrán.



8. ábra Egy és két exponenciális görbeillesztés egy próbatest (2öregített2) példáján

R^2 értékek: egy exponenciális 0,9467 (σ^d) és 0,9746 (ε^d); két exponenciális 0,9566 (σ^d) és 0,9933 (ε^d)

A paraméterértékek lineáris illesztést követően adódtak, amelynek eredményeképpen azt találtuk, hogy a kúszás során mind a feszültség, mind az alakváltozás esetében azok első deriváltjainak használata pontos leírást biztosít. Ennek megfelelően a kísérletsorozat ezen szakaszának leírására a

magasabb rendű deriváltak nem szükségesek. A kiszámított paraméterértékek láthatóak a 6. táblázatban. A PVC degradációjának következtében a τ^d és a β^d értékek csökkentek, míg az α^d értékek növekedtek az öregítési idő előrehaladtával.

6. táblázat Kúszási szakaszra számított paraméterértékek

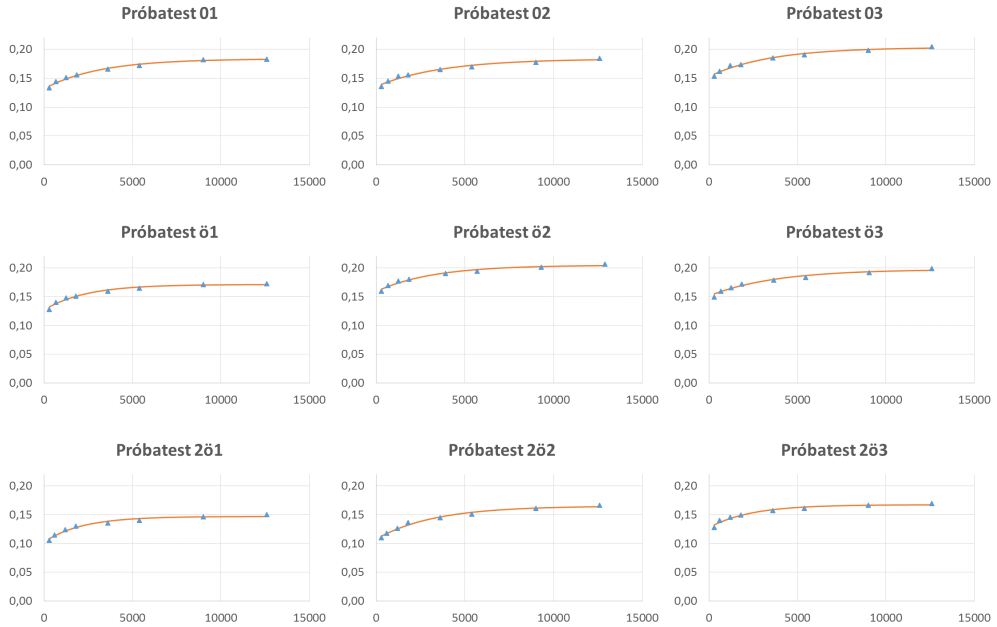
Öregítési idő [h]	Próbatest (index)	τ^d [h]	α^d [MPa]	β^d [MPa·h]
0	öregítetlen1 (01)	0,99	4,51	3,93
	öregítetlen2 (02)	1,65	4,48	4,63
	öregítetlen3 (03)	1,50	4,30	4,15
	Átlag	1,38	4,43	4,24
2541	1öregített1 (ö1)	0,66	5,00	3,16
	1öregített2 (ö2)	1,17	4,58	4,05
	1öregített3 (ö3)	0,95	4,40	4,52
	Átlag	0,93	4,66	3,91
4000	2öregített1 (2ö1)	0,29	5,90	3,52
	2öregített2 (2ö2)	0,80	5,06	4,57
	2öregített3 (2ö3)	0,52	5,13	3,35
	Átlag	0,54	5,36	3,81

A kapott eredmények pontosságának ellenőrzésére összevetettük a mért és a paraméterekből számított értékeket. A 7. táblázatban az ε^d mérési értékei és a mérési pontokra a paraméterek segítségével számított deviatorikus alakváltozás értékeinek átlagos abszolút eltérése látható, valamint az R^2 értékek az összes vizsgált próbatest esetén.

7. táblázat Mért és modellezett adatpárok átlagos abszolút eltérése (ÁAE) és R^2 értékei (mérési ε^d értékek min: 0,1054 max: 0,2071; modellezett ε^d értékek min: 0,1083 max: 0,2042)

Öregítési idő [h]	Próbatest (index)	ÁAE	R^2
0	öregítetlen1 (01)	0,0016	0,9876
	öregítetlen2 (02)	0,0023	0,9727
	öregítetlen3 (03)	0,0018	0,9811
2541	1öregített1 (ö1)	0,0022	0,9717
	1öregített2 (ö2)	0,0022	0,9743
	1öregített3 (ö3)	0,0025	0,9668
4000	2öregített1 (2ö1)	0,0023	0,9701
	2öregített2 (2ö2)	0,0022	0,9817
	2öregített3 (2ö3)	0,0021	0,9628

A kapott eredmények pontosságának szemléltetésére szolgál a 9. ábra, a mérési pontok és a kapott paraméterekből visszaszámolt görbék megjelenítése a próbatestek indexeivel jelölten.



9. ábra Paraméterekből számított görbék és a mérési pontok kúszásra vonatkozóan (x tengely: $t[s]$; y tengely: ε^d)

A kúszási szakaszra meghatározott jellemző paraméterértékek jelentős változáson mennek keresztül az öregítési idő növekedésével. A kúszás modellezésére a Poynting-Thomson modell megfelelőnek bizonyult, így a második derivált szorzótényezőjeként szereplő γ^d értékére 0 adódott.

Áttérve az alábbi hagyományos jelölésekre:

$$\tau^d = \tau, \quad \alpha^d = 2G, \quad \beta^d = 2\eta, \quad \gamma^d = \theta$$

A kúszási szakaszra vonatkozó eredmények a fenti jelölésekkel a 8. táblázatban láthatóak.

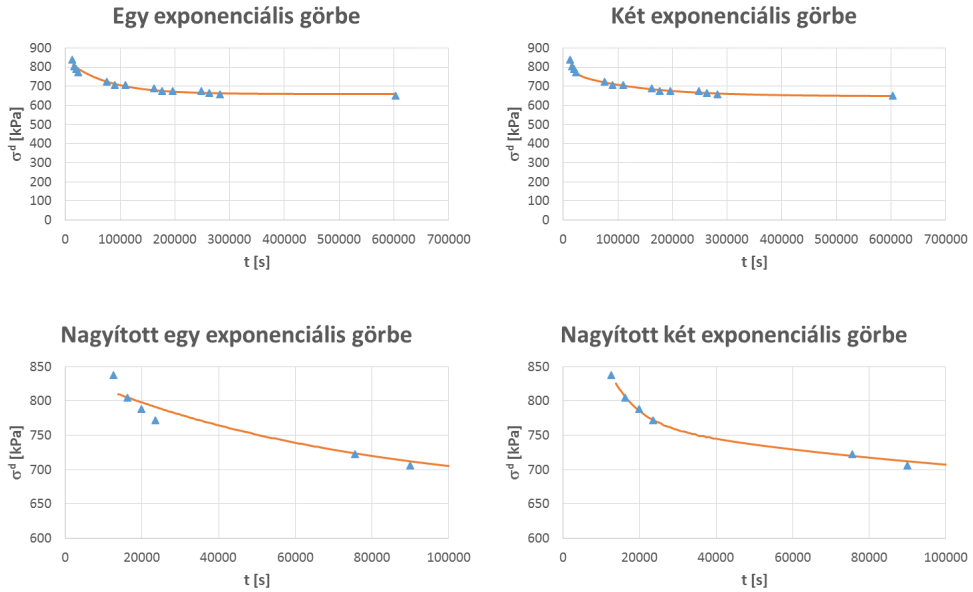
8. táblázat A kúszásra vonatkozó számított átlag és korrigált szórás értékek az öregítési idő függvényében

Öregítési idő [h]	τ [h]		G [MPa]		η [MPah]	
	érték	korrigált szórás	érték	korrigált szórás	érték	korrigált szórás
0	1,38	0,34	2,22	0,06	2,12	0,18
2541	0,93	0,26	2,33	0,16	1,95	0,35
4000	0,54	0,26	2,68	0,23	1,91	0,33

4.1.2. Relaxáció

A relaxáció a kúszást követően a tömeggel terhelt vég felültetésével kezdődött. A relaxáció hossza nem egyezett meg minden egyes próbatest esetén. Minimum 70, de bizonyos esetekben akár 430 órán keresztül is tartott a szálak relaxációja. A kiértékeléshez a relaxáció kezdetéhez közeli értékeket nem vettük figyelembe a kezdeti bizonytalanság kiküszöbölése végett. A relaxáció során a hossz- és keresztirányú alakváltozások befagytak, így a deformáció konstans volt. Ennek megfelelően az alakváltozás deriváltjait nem kellett figyelembe venni, így csak a deviatorikus feszültség (σ^d) időtől függő értékeire végeztük el a görbeillesztést. Ebben az esetben arra a megállapításra jutottunk, hogy az egy exponenciális illesztés nem ad kielégítő eredményt, ezért két exponenciális egyenlettel dolgoztunk.

$$y = y_0 + A_1 e^{\frac{-x}{t_1}} + A_2 e^{\frac{-x}{t_2}} \quad (7)$$



10. ábra Egy és két exponenciális görbeillesztés a relaxáció első szakaszára történő nagyítással (2ö2 próbatest)

R^2 értékek: egy exponenciális: 0,9625; két exponenciális: 0,9933

A 10. ábrán látható, hogy az egy exponenciális illesztés nem biztosított kielégítő eredményt különösen a relaxáció kezdeti szakaszára vonatkozóan. Ennek megfelelően két exponenciális illesztéssel dolgoztunk a következő, korábban ismertetett Prony sorozat képlete alapján, $i=2$ tényezővel.

$$\sigma^d(t) = \sigma_\infty^d + \sum_{i=1}^n \sigma_i^d e^{\frac{-t}{\tau_i}} = \sigma_\infty^d + \sigma_1^d e^{\frac{-t}{\tau_1}} + \sigma_2^d e^{\frac{-t}{\tau_2}} \quad (8)$$

Ahol ismételten σ_∞^d a hosszú távú modulus, τ_i a relaxációs idők. A kúszási szakaszhoz hasonlóan a deviatorikus feszültség deriváltjait itt is az illesztett görbék segítségével állítottuk elő. Ezt követően lineáris illesztés segítségével határoztuk meg a paramétereket, amelyek között a második derivált használata szükségesnek bizonyult a vizsgált esetben. Ez azt jelenti, hogy a korábban

ismertetett Kluitenberg-Veerhás modell nem megfelelő a vizsgált anyag relaxációjának leírására. Az általános egyenletet ki kell egészítenünk a deviatorikus feszültség második deriváltjával és annak koefficiensével.

$$\sigma^d + \tau^d \dot{\sigma}^d + \xi^d \ddot{\sigma}^d = \alpha^d \varepsilon^d + \beta^d \dot{\varepsilon}^d + \gamma^d \ddot{\varepsilon}^d \quad (9)$$

Fentieket összegezve kiemelendő, hogy a kúszás esetén csak a feszültség és az alakváltozás első deriváltjaig bezáróan használtuk a tagokat, de itt, a relaxációs szakaszban a feszültség második deriváltja is szükséges a megfelelő jellemzéshez. A második derivált szorzó koefficiensét (ξ^d) tehetetlenségi tényezőnek nevezzük a rezgés differenciálegyenletének analógiájára. A második derivált használata más modellekben is megjelenik, például a Burgers modellben. Az általunk kapott egyenlet módosítja a Burgers modellt, ahol az alakváltozás (ε) nem szerepel, csupán annak idő szerinti első és második deriváltja. Ennek megfelelően a kapott modell lehetséges elnevezése a módosított Burgers modell. A kiszámított paraméterértékek láthatóak a 9. táblázatban. A PVC degradációjának következtében a τ^d és a ξ^d értékei csökkentek illetve az α^d értékei növekedtek az öregítési idő növekedésével.

9. táblázat Relaxációra számított paraméterértékek

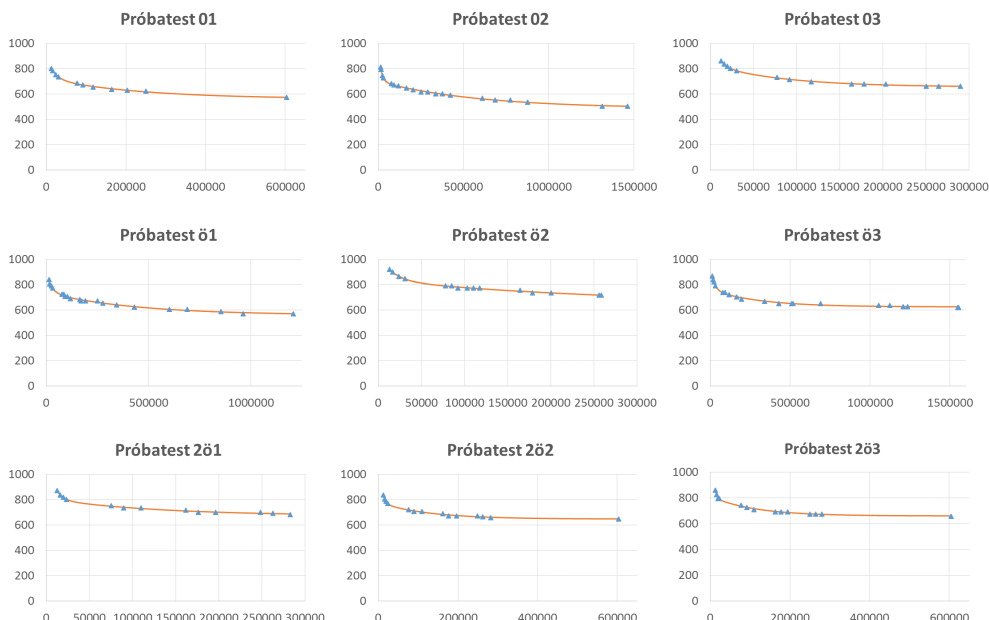
Öregítési idő [h]	Próbatest	τ^d [h]	ξ^d [h ²]	α^d [MPa]
0	öregítetlen1 (01)	70,32	327,82	3,07
	öregítetlen2 (02)	168,89	742,49	2,63
	öregítetlen3 (03)	192,40	706,29	2,76
	Átlag	143,87	592,20	2,82
2541	1öregített1 (ö1)	129,63	848,30	3,24
	1öregített2 (ö2)	80,09	328,13	3,10
	1öregített3 (ö3)	92,54	525,50	3,14
	Átlag	100,75	567,31	3,16
4000	2öregített1 (2ö1)	36,80	67,70	4,50
	2öregített2 (2ö2)	37,37	71,77	3,89
	2öregített3 (2ö3)	32,30	37,07	3,85
	Átlag	35,49	58,85	4,08

A kapott eredmények pontosságának ellenőrzésére relaxáció esetén is összevetettük a mért és a paraméterekből számított értékeket. A 10. táblázatban az σ^d mérési értékei és a mérési pontokra a paraméterek segítségével számított deviatorikus feszültség értékeinek átlagos abszolút eltérése látható, valamint az R^2 értékek, az összes vizsgált próbatest esetén.

10. táblázat Mért és modellezett adatpárok átlagos abszolút eltérése (ÁAE) és az R^2 értékek (mérési σ^d értékek min: 616,86 kPa max: 865,76 kPa; modellezett σ^d értékek min: 617,82 kPa max: 868,37 kPa)

Öregítési idő [h]	Próbatest (index)	ÁAE [kPa]	R^2
0	öregítetlen1 (01)	3,4267	0,9923
	öregítetlen2 (02)	3,9931	0,9876
	öregítetlen3 (03)	2,9725	0,9943
2541	1öregített1 (ö1)	5,2481	0,9720
	1öregített2 (ö2)	3,3692	0,9890
	1öregített3 (ö3)	5,2015	0,9819
4000	2öregített1 (2ö1)	4,4415	0,9768
	2öregített2 (2ö2)	4,3838	0,9769
	2öregített3 (2ö3)	3,8517	0,9850

A kapott eredmények pontosságának szemléltetésére szolgál a 11. ábra, a mérési pontok és a kapott paraméterekből visszszámolt görbék megjelenítése a próbatestek indexeivel jelölten.



11. ábra Paramétereiből számított görbék és a mérési pontok relaxációra vonatkozóan (x tengely: $t[s]$; y tengely: $\sigma^d[kPa]$)

Érdemes megjegyezni, hogy relaxáció esetén a paraméterek meghatározása minden esetben ugyanazon intervallumon (24 000 s - 250 000 s) történt. A 11. ábra alapján látható, hogy a meghatározott paraméterek jól jellemzik a teljes relaxációt, nemcsak azt a szakaszt, amelyre a meghatározás történt. A kapott értékek stabilnak bizonyultak a teljes szakaszra vonatkozóan. Értékük a korábban bevezetett általános jelölés szerint a 11. táblázatban láthatóak.

11. táblázat A relaxációra vonatkozó számított átlag és korrigált szórás értékek az öregítési idő függvényében

Öregítési idő [h]	τ [h]		ξ^d [h ²]		G [MPa]	
	érték	korrigált szórás	érték	korrigált szórás	érték	korrigált szórás
0	143,87	64,77	592,20	229,67	1,41	0,11
2541	100,75	25,77	567,31	262,60	1,58	0,04
4000	35,49	2,78	58,85	18,97	2,04	0,18

4.1.3. Kúszás és relaxációs kísérletek eredményeinek értékelése

A kísérletsorozat során UV fény által különböző ideig mesterségesen öregített PVC szálak komplex, hosszú idejű kúszás és relaxációs vizsgálataira került sor. A kísérleti eredmények kiértékelése során a kúszás és relaxációs részeket külön elemeztük. A feszültség és az alakváltozás tenzor deviatorikus részével dolgoztunk, és a deviatorikus mérési értékekre illesztett görbék segítségével, lineáris illesztést követően határoztuk meg a paraméterértékeket. Az eredmények alapján arra a megállapításra jutottunk, hogy a vizsgált esetben a kúszás leírására a Poynting-Thomson modell megfelelőnek bizonyult és a kiszámított paraméterértékek jól jellemzik az öregítés miatti degradációt.

A relaxációs szakasz vizsgálata során a második derivált használata szükségesnek bizonyult a megfelelő pontosságú közelítéshez és stabil paraméterértékekhez. Így ebben az esetben egy módosított Burgers modellt alkalmaztunk, és a kapott paraméterértékek a relaxáció teljes vizsgált hosszára nagyon stabilnak bizonyultak. Az értékek változásai ebben az esetben is jól jellemzik az öregítés miatti degradációt.

Az elvégzett munka az alkalmazott új, módosított Burgers modell bemutatásával és használatával hozzájárulhat a terület szakirodalmi hátterének fejlődéséhez. A modell alkalmazása más hőre lágyuló anyagok esetében is lehetséges. Meglátásunk szerint a kiszámított anyagparaméter értékek a kutatók és ipari szereplők érdeklődésére is számot tarthat.

4.2. PVC szálak rezgőhúrként történő vizsgálata mesterséges öregítéssel

A kísérletsorozat eredményeinek értékelését azonos módon végeztük az öregítetlen és az UV fénnel öregített szálak esetében. A 12. táblázat tartalmazza az első tíz kitérés öregítési kategóriánkénti átlag és a hozzájuk tartozó korrigált szórás értékeit.

12. táblázat Kitérések átlagértékei és korrigált szórás értékek az öregítési idő függvényében

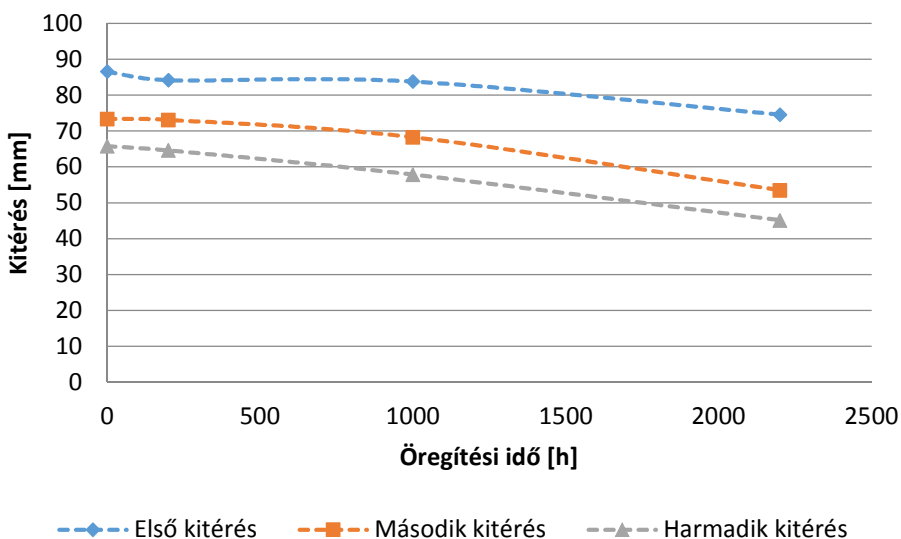
	Kitérés [mm] (Korrigált szórás [mm])									
Öregítés ideje [h]	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
0	86,61 (0,38)	73,41 (3,18)	65,80 (5,02)	55,51 (3,02)	51,92 (3,35)	44,23 (3,35)	43,60 (3,33)	37,44 (2,79)	39,16 (3,01)	33,46 (2,91)
200	84,21 (2,29)	73,15 (1,15)	64,63 (3,35)	56,48 (1,40)	52,04 (1,95)	44,78 (2,56)	43,36 (1,56)	38,15 (0,85)	38,15 (0,85)	34,63 (0,64)
1000	83,84 (1,19)	68,33 (2,00)	57,89 (1,06)	48,71 (1,95)	44,63 (1,40)	37,78 (1,11)	36,85 (1,15)	32,78 (1,11)	33,52 (1,16)	30,19 (1,16)
2200	74,61 (1,02)	53,54 (2,21)	45,17 (2,12)	34,45 (1,52)	34,50 (1,59)	28,61 (1,27)	30,35 (1,44)	25,74 (0,85)	28,24 (1,05)	23,63 (0,71)

A csillapodó rezgőmozgás egyik jellemző mérőszáma a logaritmikus dekrementum, amely a természetes logaritmus a két egymást követő, azonos értelmű amplitúdó hányadosának. A logaritmikus dekrementumok értékei láthatóak első tíz kitérésre a 13. táblázatban.

13. táblázat Logaritmusos dekrementum értékek az öregítési idő függvényében

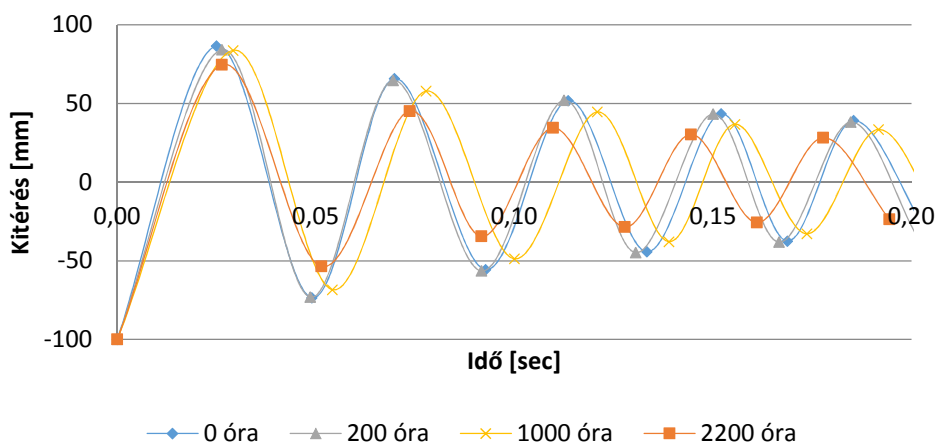
Öregítési idő [h]	Logaritmusos dekrementum							
	1-3	2-4	3-5	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10
0	0,27	0,28	0,24	0,23	0,17	0,17	0,11	0,11
200	0,26	0,26	0,22	0,23	0,18	0,16	0,13	0,10
1000	0,37	0,34	0,26	0,25	0,19	0,14	0,09	0,08
2200	0,50	0,44	0,27	0,19	0,13	0,11	0,07	0,09

A 12. és 13. táblázatban rögzítetteknek megfelelően jelentős tulajdonságváltozást figyelhattunk meg. Látható, hogy az azonos értelmű kitérések mértéke csökkent az öregítési idő előrehaladtával, és a logaritmusos dekrementum szintén jelentős különbséget mutat a különböző ideig öregített PVC szálak esetében. Ezen változások szemléltetésére a 12. ábrán látható az első három kitérés változása a különböző öregítési időt követően.



12. ábra Kitérések változása az öregítési idő függvényében

A 12. ábra jól szemlélteti a kitérés értékek csökkenését az öregítési idő növekedésével, kiemelve az első három kitérést. 2200 órás öregítési időt követően jelentős változás látható az amplitúdó értékekben. Nemcsak a kitérés értékek, hanem a rezgés frekvenciája is változott az öregítési idő növekedésével. A 13. ábra az első tíz kitérés átlagértékét mutatja az idő függvényében.



13. ábra A szálak kitéréseinek átlagértékei az idő függvényében a pendítést követően

A 13. ábrán nemcsak az öregítési idő növekedésével a kitérés értékek csökkenése látható, hanem a rezgés frekvenciájának változása is. Megfigyelhető, hogy az 1000 órás öregítési idő esetén a frekvencia alacsonyabb (rezgés periódusideje magasabb), mint az öregítetlen szálak esetén. 2200 órás öregítéshez tartozóan magasabb frekvenciaértéket láthatunk, amely meghaladja az öregítetlen szálak esetében kapott frekvenciaértéket is.

Az eddigiek alapján a rezgés alaposabb vizsgálatát tartottuk szükségesnek. Azt tapasztaltuk, hogy a kitérés értékek jelentősen változtak, és szintén kimutatható változás volt a frekvenciaértékek esetén. Ezek alapján célszerűvé

vált, hogy ne kizárólag az amplitúdókat vizsgáljuk, hanem a szál helyzetét minden rendelkezésre álló képkockában. Ennek megfelelően a videofelvételek alapján meghatároztuk a szálak pozícióját az idő függvényben a korábban vizsgált intervallumra (első tíz kitérés). Ezek alapján pontosabb képet kaptunk a szálak rezgéséről és azok csillapodásáról.

A csillapodó húr rezgőmozgásának matematikai modellje [81]:

$$T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + C \frac{\partial y}{\partial t} \quad (10)$$

Ahol T a feszítőerő, μ a hosszegységre jutó tömeg, és C a húr csillapítási tényezője. Alkalmazva a $y(x, t) = X(x)\phi(t)$ változók szétválasztási módszerét az általános megoldás a következő:

$$y(x, t) = e^{-\xi \omega t} \{ \alpha \cos \lambda x + \beta \sin \lambda x \} \left\{ A \cos \left(\omega \sqrt{1 - \xi^2} \right) t + B \sin \left(\omega \sqrt{1 - \xi^2} \right) t \right\} \quad (11)$$

Ahol:

$$\omega \triangleq c\lambda, \quad \xi \triangleq \frac{K}{2c\lambda}, \quad K \triangleq \frac{C}{\mu}, \quad c \triangleq \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Az esetünkre vonatkozó egyszerűsítésekkel ($\xi = \frac{l}{2}$) a következő egyenlet adódik a húr csillapodó rezgésének leírására:

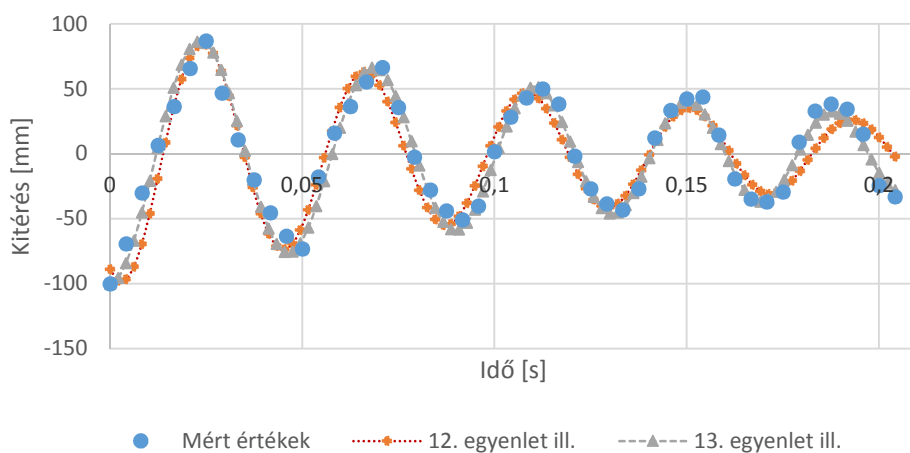
$$y(t) = A_0 * e^{-\beta t} * \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (12)$$

Ahol A_0 az amplitúdó, β a csillapítási tényező, f_0 a rezgés frekvenciája és φ a fázis. A kísérleti eredmények jobb követését biztosítja a 13. egyenlet szerinti

leírás (átlag R^2 értékek 12. egyenlettel: 0,79; 13. egyenlettel: 0,93), így a csillapodó rezgés első szakaszának leírására a következő egyenlet segítségével végeztük el az illesztést:

$$y(t) = A_0 * e^{-\beta t} * \cos(2\pi(f_0 + f_t t)t) \quad (13)$$

Ahol f_t a szöggyorsulás. A 14. ábra szemlélteti a különbséget a két különböző egyenlettel történő illesztés esetében. A β , f_0 és f_t átlagértékei a 14. táblázatban láthatóak.



14. ábra A két különböző illesztés eredménye egy öregítetlen (index: 03) próbatest példáján

14. táblázat A vizsgált paraméterek átlagértékei

Öregítési idő [h]	Paraméter					
	β		f_0 [Hz]		f_t [1/s ²]	
	érték	korrigált szórás	érték	korrigált szórás	érték	korrigált szórás
0	5,94	0,51	20,92	1,27	19,73	4,83
200	5,97	0,17	20,45	0,83	23,88	1,35
1000	6,81	0,39	17,95	0,05	31,78	3,20
2200	9,52	0,09	20,54	1,46	30,91	4,07

Az eredmények alapján látható, hogy esetünkben a β jól jellemzi a csillapodó rezgőmozgást a különböző öregítési időt követően. Fontosnak tartottuk továbbá megvizsgálni a kapcsolatot a β , f_0 , f_t és más paraméterek között. Ennek megfelelően anyagvizsgálatokat végeztünk, ahol meghatároztuk minden egyes szál esetében a szakítószilárdság (R_m), a szakadási nyúlás (A) és a Young modulus (E) értékeket. Ezeket az értékeket a szakirodalomban számos esetben használják öregítési kísérletek esetén a degradáció mértékének meghatározására. Egy korábbi tanulmányban, ahol a PVC szakítószilárdságát mérték különböző öregítési idő után [54], növekedést tapasztaltak az értékben az öregítetlen próbatestekéhez képest. Ezt a mi vizsgálataink is alátámasztották, esetünkben szintén növekedtek a szakítószilárdság értékek az öregítetlen szálakéhoz képest. Ahogy várható volt a szakadási nyúlás értékei csökkentek az öregítési idő növekedésével, mint számos más korábbi tanulmány esetében [53, 54, 110]. A Young modulus szintén jelentősen növekedett az öregítési idő előrehaladtával.

A hagyományosan mért paraméterek (R_m ; A ; E) és a 13. egyenletben ismertetett három paraméter (β ; f_0 ; f_t) közötti kapcsolat elemzése céljából korrelációs koefficiens számítottunk. Ennek eredményeképpen azt állapítottuk meg, hogy esetünkben a csillapítási tényező (β) jelentős negatív lineáris kapcsolatot (korrelációs koefficiens (r) = -0,86) mutatott a szakadási

nyúlással. A köztük lévő lineáris kapcsolatnak köszönhetően ezen paraméterek mindegyike jól jellemzi a próbatestek degradációját. Erős lineáris kapcsolatot nem találtunk az f_0 és a többi paraméter között, de az f_t erősen korrelált az R_m ($r=0,96$), A ($r=0,93$) és E ($r=0,96$) paraméterekhez. Ezáltal a dinamikus kísérleten alapuló vizsgálatsorozat által meghatározott szöggyorsulás érték (f_t) jól jellemzi az anyag viselkedését, és erős kapcsolatot mutat a vizsgált mechanikai paraméterekkel.

Véleményünk szerint az ismertetett kísérletsorozat nagy előnye, hogy az anyag mechanikai tulajdonságairól és az anyagi degradáció szintjéről roncsolásmentes módon nyújt információt. A bemutatott paraméterek meghatározásával a PVC szálak degradációs állapotának meglehetősen pontos meghatározására nyílik lehetőség.

4.2.1. A rezgőhúr kísérletsorozat eredményeinek értékelése

A PVC szálak egyre merevebbé válnak az UV öregítési idő növekedésével. Ez a merevség érzékelhető, ha a szálakat húrként kifeszítjük és megpendítjük. A csillapodó rezgőmozgás megfigyelése révén alacsonyabb kitérés értékeket figyelhetünk meg az öregítési idő előrehaladtával. Munkacsoportunk által végzett kísérletsorozat során a csillapított rezgőmozgáshoz tartozó paraméterértékeket határoztuk meg és jellemeztük a jelenséget. Megvizsgáltuk a meghatározott paraméterek és más, hagyományosan vizsgált paraméterek közötti összefüggéseket. A meghatározott paraméterek segítségével roncsolásmentes módon kaptunk információt az anyag degradációs állapotáról.

4.3. Csövek tönkremenetelének vizsgálata rezgésdiagnosztikai eszközökkel

Az eredményeket döntően a rozsdamentes acélcső esetében mutatjuk be. A PVC csővel kapcsolatos eredmények kiértékelésénél a végeselemes kiértékelés még folyamatban van. A kísérletek során a befogott cső befogások közötti szakaszán végeztük el a méréseket. Ezen a szakaszon a vizsgált cső longitudinális rezgései egy mindkét végén fixen befogott gerenda rezgéséhez hasonlatosak. Egyetlen fesztávú gerenda különböző módusokkal rezeg, amelyből a sajátfrekvenciák (f_0) számíthatóak a következő képlettel [111, 112]:

$$f_0 = \frac{\lambda}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (14)$$

Ahol l a hossz, E az anyag rugalmassági modulusa, I a tehetetlenségi nyomaték a keresztmetszetben, m a gerenda folyómétertömege, és λ a befogástól és a sajátfrekvencia számától függő frekvencia faktor, amely értéke az első sajátfrekvenciára fix befogás esetén 22,4, míg kéttámaszú tartó esetén 9,87 [111].

A longitudinális rezgések mellett a cső falában kerületi rezgések (circumferential vibrations) is keletkeznek, amelyeket szintén figyelembe kellett vennünk vizsgálataink során [113]. Ezen sajátfrekvenciák számítására a következő képlet alkalmazható [111, 112]:

$$f_0 = \frac{\lambda_i}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (15)$$

Ahol R a csőfal középsugara, ρ a cső anyagának sűrűsége, és ν a Poisson szám. λ_i itt is a dimenzió nélküli frekvencia faktor, amelyet a következőképpen lehet számítani [111, 112]:

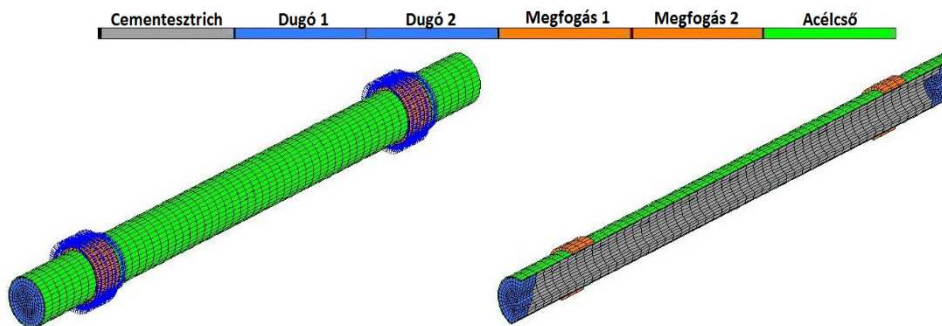
$$\lambda_i = \frac{t}{R\sqrt{12}} \frac{i(i^2-1)}{\sqrt{1+i^2}} \quad (16)$$

Ahol t a cső falvastagsága, i pedig a modus.

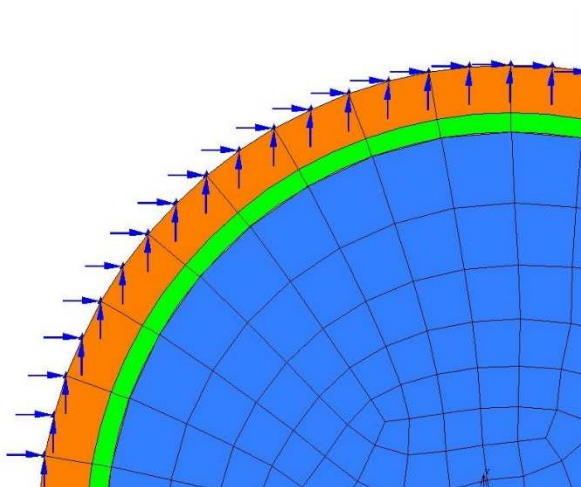
A befogások közötti szakaszon mért frekvencia értékek alapján meg kívántuk vizsgálni, hogy milyen befogásnak tekinthető az esetünkben alkalmazott, és hogy milyen korrekciós faktort kell alkalmazni a mért és a számított értékek összehangolásához. A szakaszon két triaxiális érzékelőt helyeztünk el, amely segítségével vizsgáltuk a gerjesztések következtében létrejövő rezgéseket. Gerjesztéshez impulzusgerjesztést (IEV) alkalmaztunk, amelyet több helyen, illetve több irányból végeztünk el, többszöri ismétléssel. A kísérleti kialakítás hosszabb vizsgált csőszakasz esetén a két gyorsulásérzékelőnek köszönhetően alkalmas lehet a rezgésterjedési-sebesség vizsgálatára is, amit helyszíni mérések esetén alkalmazhatónak tartunk. Jelen esetben a rezgésterjedési sebességhez képest kicsi volt az érzékelők távolsága, ezért annak elemzésére az alkalmazott kísérleti elrendezés esetén nem volt lehetőségünk.

MSC szimulációs szoftvercsomag MARC általános végelelemes megoldó szoftverének használatával elvégeztük a végelelemes modellezését a rozsdamentes acélcsőnek, melynek belső falán cementesztrich réteg található. A rendszer négy különböző alapanyagú elemet foglalt magában: acélcső, cementesztrich réteg a cső belső falán (három különböző vastagságban), KPE dugók a cső két végének lezárására és a mechanikai megfogás gumilapokon

keresztül. A VEM rendszer modelljét mutatja a 15. ábra, míg a 16. ábrán a mechanikai megfogás részletei láthatóak.



15. ábra A VEM rendszer felépítése (rozsdamentes acélcső)



16. ábra A gumis megfogás elemei (fix csomópontokkal a külső felületen)

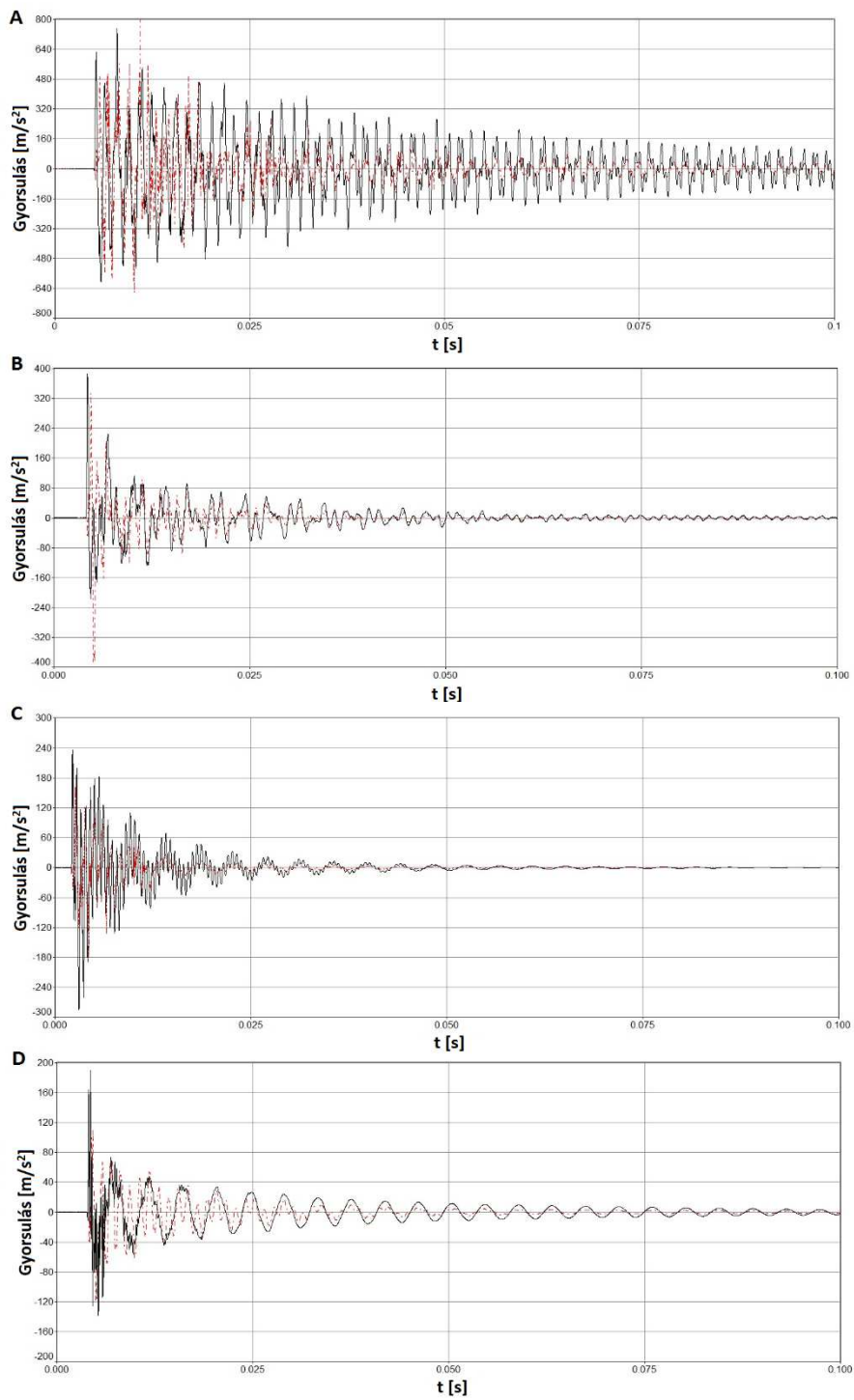
A modell elemeinek felépítéséhez háromdimenziós, hatsíkú elemeket használtunk fel. Az egymással érintkező részek ragasztottan kapcsolódnak egymáshoz. Lineárisan rugalmas beállítást alkalmaztunk az anyagi viselkedés leírására. A tulajdonságok a 15. táblázatban szerepelnek.

15. táblázat A modellszámítás során használt anyagtulajdonság értékek (rozsdamentes acélcső)

Anyag	Mennyiség	Érték és mértékegység
Acél EN1.4541	Rugalmassági modulus	200000 MPa
	Poisson-tényező	0,3
	Sűrűség	7900 kg/m ³
Gumi (megfogás)	Rugalmassági modulus	5,8 MPa
	Poisson-tényező	0,45
	Sűrűség	1000 kg/m ³
Cementesztrich	Rugalmassági modulus	22000 MPa
	Poisson-tényező	0,2
	Sűrűség	1600 kg/m ³
KPE (dugók anyaga)	Rugalmassági modulus	1035 MPa
	Poisson-tényező	0,45
	Sűrűség	1000kg/m ³

4.3.1. Csőrezgés kísérletsorozat eredményei

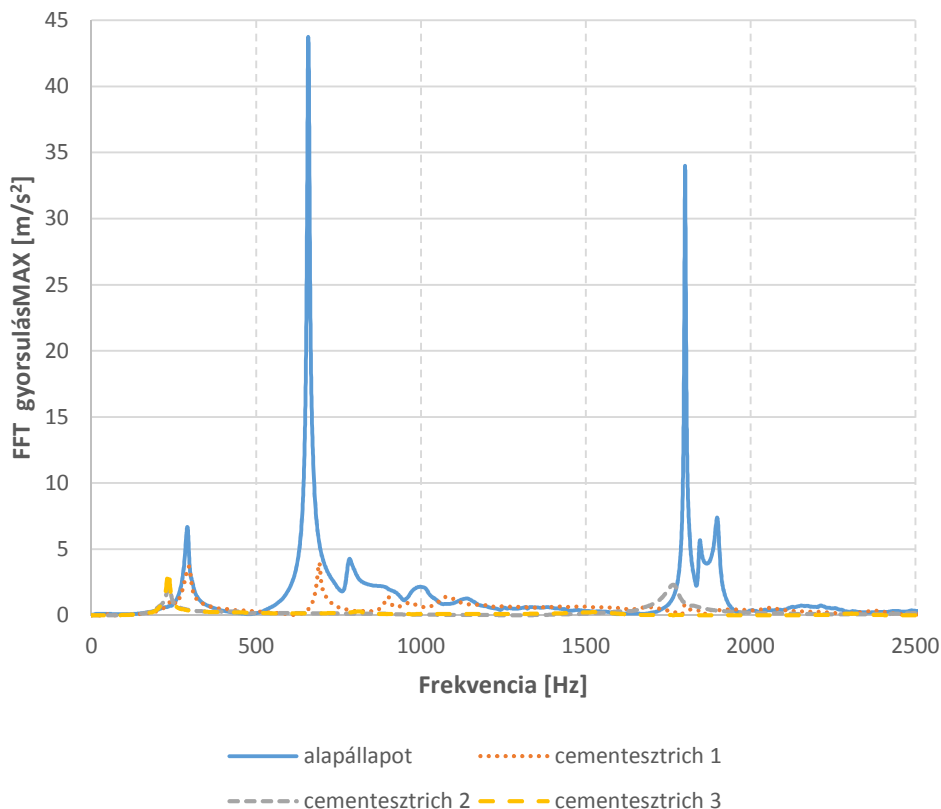
A kísérletsorozat során abból a feltételezésből indultunk ki, hogy a csőelemben a betonozás következtében végbemenő merevségváltozás érzékelhető a rendszer sajátfrekvenciájának változásán keresztül. A mérések során ugyanazon gerjesztés mellett több mérést folytattunk az esetleges hibák kiszűrése végett. A 17. ábra ugyanolyan típusú impulzus jellegű gerjesztésre adott válaszát mutatja a csőszakasznak az alapállapotban (17. ábra a része), majd pedig a betonozási fázisok után (17. ábra b-d része). Az ábrasorozaton a két triaxiális rezgésérzékelő által egyidejűleg mért gyorsulásértékek láthatóak a tengelyre merőleges, függőleges (x) irányban.



17. ábra Mért gyorsulásértékek x irányban (folytonos vonal gyorsulásmérő 1 (acc. 1.), pontozott szaggatott gyorsulásmérő 2 (acc. 2.), rozsdm. acélcső)

A 17. ábrán szereplő értékek impulzusgerjesztéshez tartoznak. Jól látható az idő függvényében kapott válaszok esetén a változás a görbék alakjára és karakterisztikájára vonatkozóan. Az ábrák alapján általánosságban elmondható, hogy a cső falán lévő egyre vastagabb réteg hatására ugyanolyan gerjesztésre kisebb amplitúdókat kaptunk, valamint - ahogy a görbék alakjából és a csillapodásából látható - csökkent az alacsonyabb frekvenciatartományba eső csúcsok száma. Az idő függvényében kapott jelek esetén megfigyelhető a magas frekvenciájú összetevők értékei, amelyek az idő előrehaladtával gyorsabban csillapodtak, mint az alacsonyabb frekvenciájúak. A későbbi időpillanatokban utóbbiak dominálták a jelet

A sajátfrekvenciák értékeléséhez a gyors Fourier transzformációval (FFT) kapott spektrumok nyújtanak lehetőséget. A 18. ábrán a korábban is kiemelt, ugyanolyan impulzus gerjesztés során kapott FFT spektrumok láthatóak, az alapállapot, és a növekvő cementesztrich rétegek esetén. Megjegyzendő, hogy a vízszintes tengely nem fedi le a sajátfrekvenciák teljes tartományát, de az alacsonyabb rendű modulusok jobb megfigyelhetősége miatt nem a rezgésérzékelők által mért teljes tartomány került bemutatásra. A 18. ábra alapján az is jól látható, hogy nemcsak a tartományba eső csúcsok száma csökken a növekvő betonréteggel, hanem a csúcsok helyzete is megváltozik. Mindegyik állapot esetén ugyanolyan gerjesztéssel többször megismételtük a mérést, így az esetlegesen jelentkező „idegen” adatokat ki tudtuk szűrni. A megmaradt stabilan jelentkező csúcsok az egyes állapotokhoz tartozó sajátfrekvenciák voltak.



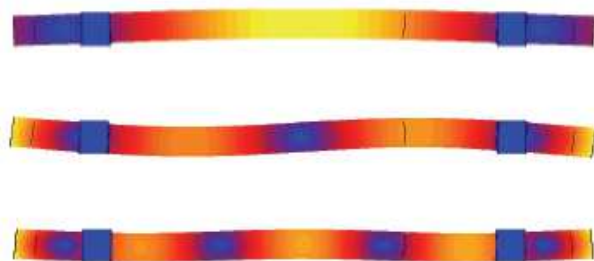
18. ábra A középső gyorsulásmérő (acc. 1) által függőleges (x) irányban kapott FFT spektrum (rozsdamentes acélcső)

A méréssel meghatározott sajátfrekvenciák csökkenő számú modulusai láthatóak az FFT felbontáson. A szerkezet merevségében bekövetkező változás is jól érzékelhető az ábra segítségével. A 16. táblázatban láthatóak a jellemző rezgésparaméter értékek, ugyanolyan gerjesztés esetén az azonos állapotokhoz tartozó eredmények átlagaként. Ezen paraméterek csökkenő értékei is jól szemléltetik a cső falában képződött cementesztrich réteg vastagodását.

16. táblázat Jellemző rezgésparaméter értékek átlagai azonos gerjesztés mellett (acc. 1, x irány) (rozsdamentes acélcső és PVC cső esetén)

		a_{peak} [m/s ²]		v_{peak} [mm/s]		d_{peak} [μm]	
		Acél	PVC	Acél	PVC	Acél	PVC
Alapállapot	átlagérték	674,53	1534,32	168,34	564,55	77,41	354,25
	korrigált szórás	77,58	338,88	18,24	133,38	14,36	63,25
Cementesztrich 1	átlagérték	226,08	231,39	63,53	77,67	42,16	74,27
	korrigált szórás	35,41	16,04	7,74	3,32	6,54	3,80
Cementesztrich 2	átlagérték	115,77	154,76	45,26	57,76	30,07	54,97
	korrigált szórás	6,42	14,54	1,66	3,18	0,67	1,90
Cementesztrich 3	átlagérték	84,44	154,93	38,80	58,59	27,31	49,84
	korrigált szórás	4,32	8,40	2,46	0,83	1,67	0,29

A VEM modellezés során kapott longitudinális sajátfrekvenciák első három modusa látható a 19. ábrán, a frekvenciaértékek összefoglalása a 17. táblázatban található.



19. ábra A longitudinális rezgés első három modusa (VEM alapján)

17. táblázat A rendszer három legalacsonyabb longitudinális sajátfrekvenciája különböző cementesztrich rétegvastagság mellett (VEM)

	Alapállapot	Cementesztrich (réteg 1)	Cementesztrich (réteg 2)	Cementesztrich (réteg 3)
Első módus [Hz]	298	249	231	223
Második módus [Hz]	923	852	799	785
Harmadik módus [Hz]	1713	1579	1497	1478

A VEM eljárással a longitudinális rezgésekhez kapott első modulusok a mérési eredményekben is jól láthatóak. Az FFT felbontáson mindegyik esetben a VEM-mel számolt első sajátfrekvencia közelében találjuk az első, egyik legnagyobb amplitúdójú csúcsot (18. ábra). Az eltérés adódhat a modell egyszerűsítéseiből, különösen a betonozott mérések esetén a cementesztrich réteg vastagságára és mechanikai tulajdonságaira vonatkozó adatokból. A korábban bemutatott 14. egyenlet segítségével is számítható a sajátfrekvencia érték, amelyet elvégeztünk a vizsgált esetben. A számítás során korrekciós tényezőket kellett használni: a 14. egyenletben bemutatott λ befogástól és a sajátfrekvencia számától függő frekvencia faktor mellett a csövek végeitől függő korrekciós faktort is alkalmazni kellett. Az így számított frekvenciák rendszerint 15%-on belüli hibával adják meg az értékeket [111]. A 18. táblázatban láthatóak az első longitudinális rezgési modulusok értékei a mérések alapján, a VEM eljárás alapján, valamint az együttes korrekciós faktor és a λ értéke, amivel számítás során megkaphatóak a mért értékek. Ezzel kapcsolatban fontos megjegyezni, hogy a cső végeitől függő korrekciós tényezőt a vizsgált esetben 0,7-nek tekinthettük Wachel és munkatársai [111] alapján. Ez a korrekciós faktor a rugalmas befogás (9,87) és a fix-fix befogás

(22,4) közé eső λ értéket eredményezett az első longitudinális sajátfrekvenciára. Ezt figyelembe véve a kísérletünkönél lévő sajátos befogás megfelelt az előzetes várakozásnak.

18. táblázat A longitudinális rezgés első sajátfrekvenciáinak és a λ korrekciós faktornak az értékei (rozsdamentes acélcső)

	Alapállapot	Cementesztrich (réteg 1)	Cementesztrich (réteg 2)	Cementesztrich (réteg 3)
Mért érték [Hz]	291	247	236	234
VEM érték [Hz]	298	249	231	223
λ értéke (vég korr. fakt.: 0,7)	10,81	17,44	17,61	17,82

A kerületi rezgés frekvenciái a modus számának növekedésével, valamint a betonozás hatására módosuló mechanikai paraméterek következtében jelentős mértékben eltolódtak a magasabb frekvenciák irányába. A 15. egyenlet szerint számíthatóak ezen frekvenciák, és egyedül csak a betonozatlan, üres cső esetében esett az $i=2$ értékhez tartozó modus a longitudinális rezgés első modulusainak közelébe. Ekkor az alapállapotú cső $i=2$ körkörös rezgésének sajátfrekvenciájára 688 Hz adódott, amely a VEM-el számítva 725 Hz. Tekintettel a számításnál korábban említett 15%-os pontosságra, ez az érték is kellően pontosnak bizonyult.

4.3.2. Csőrezgés kísérletsorozat eredményeinek értékelése

A vízkőképződéshez hasonló belső átmérő csökkenést eredményező jelenségek modellezése lehetséges a kísérletsorozat során bemutatott

módszerrel, amely során különböző rétegvastagságban történt cementesztrich felvitele a csövek belső falára. A csövek falára kiváló vízkőhöz hasonlatosan a cső falára felvitt cementesztrich rétegek a cső rezgésparamétereiben változást okoznak, amelyek egyértelműen detektálhatóak a bemutatott impulzusgerjesztéses rezgésdiagnosztikai mérésekkel. Ezáltal roncsolásmentes módon információt kaphatunk a csőszakasz állapotáról, a benne képződött réteg vastagságáról. A mérési eredményeinket összevetettük az azokat jól közelítő VEM szimulációval kapott sajátfrekvencia értékekkel. A sajátfrekvenciák értékeinek változása, valamint az adott típusú gerjesztéshez kapott rezgésparaméter értékek jól jellemzik a csőszakasz állapotát a bemutatott kísérletsorozat esetén. Véleményünk szerint a módszer alkalmas lehet helyszíni mérések esetén is csövek állapotvizsgálatára.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az értekezésben három kísérletsorozat és a hozzájuk kapcsolódó új tudományos eredmények kerültek bemutatásra. Az első ismertetett kísérletsorozatban PVC szálakon folytatott hosszú idejű, komplex kúszás-relaxációs kísérletek szerepeltek. Ebben az anyagi viselkedés tanulmányozása mellett az azt leíró anyagi paraméterek számszerű meghatározása volt a célunk. A vizsgált anyagon UV fény segítségével mesterséges öregítést hajtottunk végre, és az öregítetlen és különböző ideig öregített szálakat azonos kísérleti körülmények között vizsgáltuk. Vizsgálatainkat a szakirodalomban használatos felbontás alapján a feszültség és az alakváltozás deviatorikus részére vonatkozóan végeztük el. Külön értékeltük a kúszás és a relaxációs szakaszokat.

Az anyag kúszásának vizsgálata során megállapítottuk, hogy az anyagi viselkedést a Poynting-Thomson modell kellően pontosan írja le. Ehhez kapcsolódóan a különböző öregítési állapotokhoz meghatároztuk az anyagi paraméterek értékeit, megvizsgáltuk azok öregítés hatására történő változását.

A relaxáció vizsgálata során arra a megállapításra jutottunk, hogy a kúszásnál alkalmazott Poynting-Thomson modell nem biztosít kellően pontos leírást, különösen a relaxáció korai szakaszára vonatkozóan. Ezért javasoltuk a feszültség idő szerinti második deriváltjának bevonását is az alkalmazandó modellbe. Az ezek alapján kapott új modellt módosított Burgers modellnek neveztük, és meghatároztuk a különböző ideig öregített szálakhoz tartozó paraméterek értékeit. Az alkalmazott modell pontosságát értékeltük és megvizsgáltuk a paraméterek változását az öregítés hatására.

A második kísérletsorozat során a korábbival azonos alapanyagú PVC szálakat vizsgáltunk rezgőhúrként. Ebben az esetben is UV fénnel különböző ideig öregítettük a szálakat, amelyeket a mérések során egy rezgőasztalon

húrként kifeszítve megpendítettünk, majd vizsgáltuk a csillapodó rezgőmozgást. A rezgőmozgás leírására szolgáló általános egyenletet új taggal bővítettük, amely esetünkben sokkal pontosabb leírást eredményezett. Az egyenletben szereplő paraméterek értékeit meghatároztuk az egyes öregítési állapotokhoz és megvizsgáltuk azok változását. A rezgésdiagnosztikai módszerrel megállapított paraméterek és az anyagtulajdonság vizsgálatok során általánosan használt paraméterek kapcsolatát értékeltük. A rezgés értékelése révén roncsolásmentes módon kaptunk információt a szálak öregítés hatására bekövetkező tulajdonságváltozásáról.

Az értekezésben ismertetett harmadik kísérletsorozat során csövek belső átmérőjének csökkenését modelleztük, mint az egyik jellemző csőtönkremeneteli formát. A kísérletsorozat során a vizsgált csövek belső falára különböző rétegvastagságban cementeszrich réteget vittünk fel, és minden állapothoz kapcsolódóan rezgésdiagnosztikai méréseket végeztünk. A rezgésparaméterek (a_{peak} , v_{peak} , d_{peak}) változásai egyértelműen jelezték a csövek csökkenő belső átmérőjét. A csövek sajátfrekvenciáinak vizsgálatát is elvégeztük a mérések alapján. A frekvenciaértékeket szakirodalmi képletek segítségével, valamint végeselemes módszer alkalmazásával számítottuk. A számítások eredményeképpen kapott értékeket összevetettük a mérések alapján meghatározott sajátfrekvencia értékekkel. Ezek alapján megállapítottuk, hogy a csövek sajátfrekvenciáinak értékelésével a csövek belső átmérőjében bekövetkező csökkenés egyértelműen követhető. Ennek eredményeképpen rezgésdiagnosztikai technika alkalmazásával roncsolásmentes módon elemeztük a csövek állapotát.

6. SUMMARY

Three series of experiments and the related new scientific results were presented in the dissertation. In the first test series long-term tensile and relaxation tests of PVC fibers were included. The aim was to investigate and describe the behavior of the examined material with sufficient precision using the applied load at constant temperature, and to gain information about the aging process using this model. Therefore, this work tries to minimize the number of necessary material parameters, which are used to characterize the possible changes and the level of degradation.

Artificial aging was performed by UV light on the test material and both unaged and aged fibers were examined under the same experimental conditions. During creep, the longitudinal and cross-sectional changes were measured of unaged and aged PVC fibers loaded with the same weight. In the relaxation section, where deformation was frozen, the stress changes were determined. The investigation was based on the splitting of the stress and strain tensors, generally used in the literature. The examination was carried out on the deviatoric part, evaluating the creep and relaxation sections separately.

The characteristic parameter values determined during the creep period went under a significant change as the aging time increases. For modeling the creep a Poynting-Thomson model proved to be adequate, as the second derivative's multiplication factor could be 0 and then the fitting still provides satisfactory results.

In the relaxed phase, the Poynting-Thomson model was not adequate, especially for the first part of the relaxation. Therefore the second order time derivatives were also involved in the applied model. The application of the second derivative occurred in other models, such as the Burgers model. The obtained equation modifies the Burgers model where the zero order derivate of

epsilon is not included. Therefore this model can be called modified Burgers model. The parameter values for this new, modified Burgers model were calculated. The accuracy of the applied model was evaluated and the changing of parameter values due to artificial aging was examined. The resulting relaxation parameters are proven to be very stable and they well characterize the aging. Therefore, compare to other methods, the applied method provides good results without fractional calculus or using high number of parameters.

This part of the work contributes to permanent literature by introducing a new, modified Burgers model for the relaxation behavior of PVC. The application of this model to other thermoplastic materials is possible. The calculated material parameter values of the examined material can be used for industrial applications.

During the second series of experiments fibers of the same PVC material were examined as vibrating strings. In this case, UV light was applied again for aging the fibers. The tests were done on a self-constructed vibrating table, where the fibers were stretched one by one for each measurement as strings by a tensional force. After the diverted and stretched fibers were twanged the motion of the string was recorded and vibration parameters were also measured. From the measurement results the first ten deflections after twanging of each fiber were determined by using video records. Moving frame by frame the deflections were specified by the help of the scale under the string.

The general equation of the oscillatory movement was expanded, and the new equation described the behavior more accurately. The parameter values in the equation were determined for the different aging states and their changing was examined. The relationship between the obtained vibration based parameters and other, commonly used parameters for material properties was evaluated.

Examination of the damped oscillation showed lower deflection values with higher aging time. Characteristics and parameters were identified and calculated for the damping process and these parameters' relationships were examined to other commonly measured indexes. The identified parameters made it possible to evaluate the degradation level of the test material in a non-destructive way.

Reduction in inner diameter of pipes, as a characteristic failure (for example limescale deposition) was modeled in the third test series. To this end, the different phases of deposition are artificially simulated in the model experiments. During the experiments screed concrete was applied in different thickness to the inner wall of the pipes. In the different states, vibration tests were performed to evaluate the status of the pipe section and the rate of deposition by a nondestructive technique. The experimental system was also analyzed by the finite element method (FEM), and the obtained results were compared.

Both stainless steel and PVC pipes were examined. The measurements were executed on a metalworking lathe, where the pipe has been supported by two steady rests. For the vibration test, two pieces of triaxial accelerometers were glued to the pipe. Tests were performed with impulse excitation of vibration from various directions and at multiple locations.

In addition to the ease of modeling the scale layer, using concrete had the advantage of exhibiting similar characteristics to the scale layer in many cases. The ranges of the density values of the two materials used for natural frequency calculations were partially overlapping. The concrete layer formed an irregular circular inner diameter, which can also be observed for scaling processes in many cases.

A commercial software package was used for finite element modal analysis of the steel pipes partly filled with concrete. The system consists of parts made of four different materials: steel pipe, concrete layer on the inner surface of the pipe (with three various thickness), plastic stoppers closing the two ends of the pipe, and the mechanical support with rubber pillows.

Changes of the vibration parameters (a_{peak} , v_{peak} , d_{peak}) clearly indicated the inner diameter decrease of the pipes. Examination of the pipes' natural frequencies were also carried out. The decreasing number of natural frequency modes was observed in the FFT (fast Fourier transform) spectrum as the concrete layer became thicker. The frequency values were calculated using formulas from the literature and finite element method. The calculated results were compared to the natural frequencies obtained from the measured values. The first modes of longitudinal vibration obtained from the FEM could be clearly identified in the measured values. In every case, the first peaks, with one of the highest amplitudes in the FFT spectrum, were close to the FEM calculation results of the first mode of the natural frequency.

It was concluded that based on the evaluation of the pipes' natural frequencies, the inner diameter decrease was clearly traceable. Using the introduced vibration diagnostic technique information about the state of the pipes was gained in a non-destructive way.

7. TUDOMÁNYOS PUBLIKÁCIÓK



DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR



Nyilvántartási szám: DEENK/190/2015.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Kocsis Dénes
Neptun kód: MNN73O
Doktori Iskola: Kémiai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10036962

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Magyar nyelvű könyv(ek) (1)

1. Bodnár I., Braun M., Horváth R., Tóth L., Trampus P., Varga F., **Kocsis D.**: Geotermikus rendszerek fenntarthatóságának integrált modellezése: 1. munkacsoport : geotermikus rendszerek károsodása, befolyásoló tényezők, ellenőrzés és karbantartás. Debreceni Egyetem, Debrecen, 111 p., 2011. ISBN: 9789634734468

Magyar nyelvű könyvrészlet(ek) (2)

2. Asszonyi C., Szarka Z., Csátár A., Horváth R., **Kocsis D.**, Ván P.: Tömör anyagok képlékeny deformációról.
In: A képlékenységi termodinamikájáról. Írták: Asszonyi Csaba, Csátár Attila, Dolezalová Márta, Fülöp Tamás, Horváth Róbert, Kocsis Dénes, Kovács László, Matolcsi Tamás, Szarka Zoltán, Ván Péter, Vásárhelyi Balázs, Hungarian Printing House, Budapest, 9-22, 2012.
ISBN: 9789630830720
3. Asszonyi C., Szarka Z., Csátár A., Horváth R., **Kocsis D.**: Anyagok mechanikai tulajdonságainak meghatározása egytengelyű laboratóriumi kísérletekkel.
In: A képlékenységi termodinamikájáról. Írták: Asszonyi Csaba, Csátár Attila, Dolezalová Márta, Fülöp Tamás, Horváth Róbert, Kocsis Dénes, Kovács László, Matolcsi Tamás, Szarka Zoltán, Ván Péter, Vásárhelyi Balázs, Hungarian Printing House, Budapest, 125-136, 2012.
ISBN: 9789630830720





DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR



Idegen nyelvű, hazai könyvrészlet(ek) (1)

4. **Kocsis, D.**, Horváth, R., Manó, S., Godó, Z.A.: Vibration analysis of artificially aged pipes.
In: XVII. Épületgépészeti, Gépészeti és Építőipari Szakmai Napok : szakkiallítás és Nemzetközi Tudományos Konferencia 2011. október 13-14. [elektronikus dokumentum]. Szerk.: Kalmár Ferenc, Balla Tibor ; közread. a Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 1-6, 2011. ISBN: 9789634734642

Idegen nyelvű tudományos közlemény(ek) hazai folyóiratban (1)

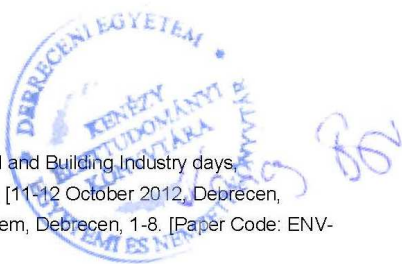
5. **Kocsis, D.**, Horváth, R., Manó, S., Godó, Z.A.: Long-term artificially aging process and vibration analysis of pipes.
Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 3 (1), 15-19, 2012. ISSN: 2062-0810.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/IRASE.3.2012.1.2>

Idegen nyelvű tudományos közlemény(ek) külföldi folyóiratban (3)

6. **Kocsis, D.**, Deák, G., Kéki, S., Dezső, G., Horváth, R.: Artificial Aging Examination of PVC Fibers as Vibrating String.
EEMJ. "Accepted by publisher" (2015) ISSN: 1582-9596.
IF:1.065 (2014)
7. **Kocsis, D.**: Modeling and vibration analysis of limescale deposition in geothermal pipes.
EEMJ. 13 (11), 2817-2824, 2014. ISSN: 1582-9596.
IF:1.065
8. **Kocsis, D.**, Horváth, R.: Experience acquired in tensile tests of plastics.
Sci. Bul. Ser. C. Fasc. Mech. Trib. Mach. Manuf. Tech. 27, 111-114, 2013. ISSN: 1224-3264.

Magyar nyelvű konferencia közlemény(ek) (3)

9. **Kocsis D.**, Horváth R.: Műanyagok öregedésvizsgálata.
In: Proceedings of 18th Building Services, Mechanical and Building Industry days, International Conference [elektronikus dokumentum] : [11-12 October 2012, Debrecen, Hungary]. Ed.: Ferenc Kalmár et al., Debreceni Egyetem, Debrecen, 1-8. [Paper Code: ENV-12-01], 2012. ISBN: 9789634735915





DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR



10. Dezső G., **Kocsis D.**, Horváth R.: Kemény polietilén csövek gerjesztett rezgéseinek Szimulációja
=Simulation of excited vibrations of high density polyethylene pipes.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2012 : konferencia előadásai
: Szolnok, 2012. május 10. Szerk.: Pokorádi László, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki
Szakbizottsága, Debrecen, 443-448, 2012. ISBN: 9789637064289
11. Horváth R., Manó S., **Kocsis D.**, Godó Z.A.: Combcsont osteoporosis kimutatása
rezgésdiagnosztika segítségével.
In: IV. Magyar Biomechanikai Konferencia. [S.n.], Pécs, 62, 2010.

Idegen nyelvű konferencia közlemény(ek) (2)

12. **Kocsis, D.**, Horváth, R., Manó, S., Godó, Z.A.: Vibration analysis of rheological properties of
artificially aged pvc filaments.
In: International Multidisciplinary Conference, 9-th Edition, Baia Mare - Nyíregyháza, 19-21
May 2011. Bessenyei Publishing House, Nyíregyháza, 127-132, 2011. ISBN:
9786155097188
13. Horváth, R., Godó, Z.A., **Kocsis, D.**, Manó, S.: Analysis of thermal water pipes using the vibration
method.
In: 15th "Building Services, Mechanical and Building Industry Days" : International
Conference : Debrecen, ... 15-16 October 2009. Szerk.: Kalmár Ferenc, Kocsis Imre,
Csomós György, Csáki Imre, Debreceni Egyetem, Debrecen, 71-76, 2009.





DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR



További Közlemények

Magyar nyelvű könyvrészlet(ek) (5)

14. **Kocsis D.**, Bertalan N., Fórián S.: Stratégiai és környezeti zajterképezés szerepe a műszaki felsőoktatásban =The Role of Strategic and Environmental Noise Mapping in Technical Education.
In: A XX. Fiatal műszakiak tudományos ülészek előadásai = Proceedings of the XX-th International Scientific Conference of Young Engineers. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 175-178, 2015.
15. Bertalan N., **Kocsis D.**, Fórián S.: Zajterképezési vizsgálatok számítógépes modellezéssel =Noise Mapping Examintaions by Computer Modelling.
In: A XX. Fiatal műszakiak tudományos ülészek előadásai = Proceedings of the XX-th International Scientific Conference of Young Engineers. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 87-90, 2015.
16. **Kocsis D.**, Princz M., Kozák L.: Természetvédelmi, környezetvédelmi, örökségvédelmi és régészeti adatbázis létrehozása a ZENFE projekt keretében.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education : 10th October 2014. Ed.: Kocsis Imre, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 86-90, 2014. ISBN: 9789634737612
17. Bodnár I., Boros N., Fehérmé Baranyai E., Fórián S., Izbékiné Szabolcsik A., Jolánkai G., Keczáné Üveges A., **Kocsis D.**: Épületek csapadékvizeinek és szűrkevízeinek vizsgálata az Észak- Alföld régióban környezetbarát és energiahatékony hasznosítás céljából.
In: Fenntartható energetika megújuló energiaforrások optimalizált integrálásával. Szerk.: Kalmár Ferenc, Akadémiai Kiadó, Budapest, 167-201, 2014. ISBN: 9789630595407
18. Fórián S., **Kocsis D.**, Mezei B.: Csapadékvíz házkörüli hasznosításának lehetősége =Planning of Domestic Rainwater Harvesting System.
In: Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka XIX : Nemzetközi Tudományos Konferencia. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 425-428, 2014.





DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR



Idegen nyelvű, hazai könyvrészlet(ek) (2)

19. Igaz, T., Lakatos, G., **Kocsis, D.**, Godó, Z. A.: Energy efficiency analysis of an environmentally friendly strawbale insulated house.
In: XVII. Épületgépészeti, Gépészeti és Építőipari Szakmai Napok : szakkiállítás és Nemzetközi Tudományos Konferencia 2011. október 13-14. : [elektronikus dokumentum].
Szerk.: Kalmár Ferenc, Balla Tibor ; közread. a Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 1-8, 2011. ISBN: 9789634734642
20. Godó, Z. A., Tóth, I., Osváth, G., **Kocsis, D.**, Igaz, T.: Red mud pollution recultivation possibilities.
In: XVII. Épületgépészeti, Gépészeti és Építőipari szakmai napok : szakkiállítás és Nemzetközi Tudományos Konferencia 2011. október 13-14. [elektronikus dokumentum].
Szerk.: Kalmár Ferenc, Balla Tibor ; közread. a Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 1-10, 2011. ISBN: 9789634734642

Magyar nyelvű közlemény(ek) hazai folyóiratban (4)

21. Godó Z. A., Révész C., **Kocsis D.**: Kompakt fénycső elektromágneses sugárzásának néhány élettani hatása II..
E-villamos, 1-5, 2011.
22. Godó Z. A., Révész C., **Kocsis D.**: Kompakt fénycső elektromágneses sugárzásának néhány élettani hatása I..
E-villamos, 1-6, 2011.
23. Godó Z. A., **Kocsis D.**, Révész C.: Az elektroszmog élettani következményei II..
Villanyszerelők lapja. 10 (4), 16-20, 2011. ISSN: 1588-8770.
24. Godó Z. A., Révész C., **Kocsis D.**: Az elektroszmog élettani következményei I..
Villanyszerelők lapja. 10 (3), 18-22, 2011. ISSN: 1588-8770.

Idegen nyelvű közlemény(ek) hazai folyóiratban (1)

25. Boros, N., Petrányi, A., **Kocsis, D.**, Bodnár, I.: Characterization of greywater sources on the base of organic content and microbial quality.
Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 5 (1), 35-40, 2014. ISSN: 2062-0810.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/IRASE.5.2014.1.4>





DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR



Idegen nyelvű közlemény(ek) külföldi folyóiratban (1)

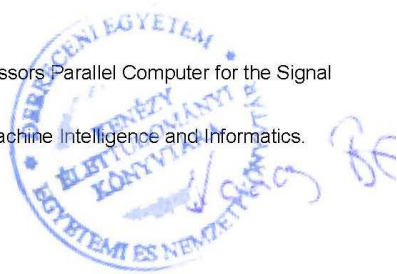
26. Mezei, B., Fórián, S., **Kocsis, D.**: The Collectable and Usable Annual Rainwater Amount in the City of Debrecen = Cantitatea de ape pluviale anuale colectabile „si utilizabile din ora„sul Debrecen.
Acta tech. Napocensis, Environ. Engineer. Sustain. Developm. Entrepreneurship. 3 (3), 11-15, 2014. ISSN: 2284-743X.

Magyar nyelvű konferencia közlemény(ek) (3)

27. Godó Z.A., **Kocsis D.**, Kiss G., Stóka G.: Algoritmusalkotó-készség újszerű vizsgálata.
In: Informatika a felsőoktatásban 2014 konferencia [elektronikus dokumentum]. Szerk.: Kunkli Roland, Papp Ildikó, Rutkovszky Edéné, Debreceni Egyetem Informatikai Kar, Debrecen, 105, 2014. ISBN: 9789634737124
28. Godó Z.A., **Kocsis D.**, Révész C., Pirger Z.: Egyes környezetterhelő neurotoxikus ágensek aktivációja a GST detoxifikációs mechanizmusra.
In: 16th "Building Services, Mechanical and Building Industry Days" International Conference : 14-15 October 2010 Debrecen, Hungary. Szerk.: Ferenc, ... Csomós György, Csáki Imre, Debreceni Egyetem, Debrecen, 206-213, 2010. ISBN: 9789634734239
29. Berecz G., Dorka G., **Kocsis D.**, Révész C., Godó Z.A.: A környezeti elektroszmog sejtkárosítása és stressztolerancia csökkentése.
In: 16th "Building Services, Mechanical and Building Industry Days" International Conference : 14-15 October 2010 Debrecen, Hungary. Szerk.: Ferenc, ... Csomós György, Csáki Imre, Debreceni Egyetem, Debrecen, 198-205, 2010.

Idegen nyelvű konferencia közlemény(ek) (2)

30. Godó, Z.A., Loós, M., **Kocsis, D.**, Révész, C.: Multiprocessors Parallel Computer for the Signal Processing of Living Nervous System.
In: IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics. [s.n.], [s.l.], 269-274, 2014. ISBN: 9781479934423





DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR



31. Godó, Z.A., Dorka, G., Berecz, G., **Kocsis, D.**: Stress tolerance and change of detoxification nearby trivial EM ray source.
In: XXXX. Membrane Transport Conference : [conference proceedings]. [S.n.], Sümeg, 71, 2010.

Idegen nyelvű absztrakt kiadvány(ok) (1)

32. Godó, Z.A., Révész, C., **Kocsis, D.**: Glutathione - S - Transferase induction effect of red mud contaminated food.
Acta Physiol. 211 (S697), 140-141, 2014. ISSN: 1748-1708.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/apha.12362>

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 2,13

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 2,13

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

Debrecen, 2015.09.14.



8. IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] C. Asszonyi, P. Ván, Z. Szarka, T. Fülöp and R. Horváth, *Izotrop Kontinuumok Anyagtulajdonságai*. Budapest: Műegyetemi Kiadó, 2008.
- [2] J. Verhás, *Termodinamika És Reológia*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1985.
- [3] P. Nagy, "Polimerek időfüggő mechanikai jellemzői, összefüggéseik elméleti és kísérleti elemzése," 2007.
- [4] C. Asszonyi, G. Béda, T. Fülöp and Z. Szarka, *Kontinuummechanikai Feladatok Megoldásáról*. Budapest: Műegyetemi Kiadó, 2009.
- [5] C. Asszonyi, T. Fülöp and P. Ván, "Distinguished rheological models for solids in the framework of a thermodynamical internal variable theory," *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2014.
- [6] L. Halász and M. Zrínyi, *Bevezetés a Polimerfizikába*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1989.
- [7] S. A. Yonan, C. Soyarslan, P. Haupt, L. Kwiakowski and A. E. Tekkaya, "A simple finite strain non-linear visco-plastic model for thermoplastics and its application to the simulation of incremental cold forming of polyvinylchloride (PVC)," *Int J Mech Sci*, vol. 66, 2013. pp. 192-201, .
- [8] A. Haufe, P. A. Du Bois, S. Kolling and M. Feucht, "A semi-analytical model for polymers subjected to high strain rates," in *5th European LS-DYNA Users Conference - Material Technology*, Birmingham, 2005, pp. 2b-58.
- [9] E. Krempl and K. Ho, "An overstress model for solid polymer deformation behavior applied to nylon 66," in *Time Dependent and Nonlinear Effects in Polymers and Composites*, 1357th ed., R. A. Schapery, Ed. Philadelphia: ASTM International, 2000, pp. 118-137.
- [10] O. U. Colak and N. Dusunceli, "Modeling viscoelastic and viscoplastic behavior of high density polyethylene (HDPE)," *J Eng Mater-T Asme*, vol. 128, 2006. pp. 572-578, .

- [11] S. Hartmann, "A thermomechanically consistent constitutive model for polyoxymethylene - Experiments, material modelling and computation," *Arch Appl Mech*, vol. 76, 2006. pp. 349-366, .
- [12] M. Kaestner, S. Blobel, M. Obst, K. Thielsch and V. Ulbricht, "Experimental Characterization of the Viscoplastic Material Behaviour of Thermosets and Thermoplastics," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 24-25, 2010. pp. 195-200, .
- [13] S. Nikolov and I. Doghri, "A micro/macro constitutive model for the small-deformation behavior of polyethylene," *Polymer*, vol. 41, 2000. pp. 1883-1891, .
- [14] S. H. Joseph, "A method for modelling the nonlinear viscoelastic response of polymers," *Mech Time-Depend Mat*, vol. 9, 2005. pp. 35-69, .
- [15] E. Pagnacco, A. Moreau and D. Lemosse, "Inverse strategies for the identification of elastic and viscoelastic material parameters using full-field measurements," *Mat Sci Eng a-Struct*, vol. 452, 2007. pp. 737-745, .
- [16] T. Nonnenmacher and W. Glöckle, "A fractional model for mechanical stress relaxation," *Philosophical Magazine Letters*, vol. 64, 1991. pp. 89-93, .
- [17] W. G. Gloeckle and T. F. Nonnenmacher, "Fractional integral operators and Fox functions in the theory of viscoelasticity," *Macromolecules*, vol. 24, 1991. pp. 6426-6434, .
- [18] R. Metzler and T. F. Nonnenmacher, "Fractional relaxation processes and fractional rheological models for the description of a class of viscoelastic materials," *Int. J. Plast.*, vol. 19, 2003. pp. 941-959, .
- [19] F. Mainardi and G. Spada, "Creep, relaxation and viscosity properties for basic fractional models in rheology," *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 193, 2011. pp. 133-160, .
- [20] J. G. Liu and M. Y. Xu, "Higher-order fractional constitutive equations of viscoelastic materials involving three different parameters and their relaxation and creep functions," *Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol. 10, 2006. pp. 263-279, .
- [21] B. Z. Margolin, A. Z. Gulenko, I. P. Kursevich and A. A. Buchatskii, "Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and

neutron irradiation. Part 1. A physico-mechanical model," *Strength of Materials*, vol. 38, 2006. pp. 221-233, .

[22] V. Devasenapathi, P. Monish and S. B. Prabu, "Experimental investigation of tensile creep behavior of polymer nanocomposites," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 44, 2009. pp. 412-418, .

[23] T. Ivanova, J. Zicans, M. Kalnins, R. Maksimov and Z. Roja, "Thermoplastic multiphase composites: Tensile and creep behavior," *Mater. Sci.*, vol. 42, 2006. pp. 771-777, .

[24] T. Mahmood, S. Kanapathipillai and M. Chowdhury, "A model for creep life prediction of thin tube using strain energy density as a function of stress triaxiality under quasistatic loading employing elastic-creep & elastic-plastic-creep deformation," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 8, 2013. pp. 181-186, .

[25] X. Wu, S. Williams and D. Gong, "A True-Stress Creep Model Based on Deformation Mechanisms for Polycrystalline Materials," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 21, 2012. pp. 2255-2262, .

[26] V. Savchenko and Y. Shevchenko, "Spatial thermoviscoplastic problems," *Int. Appl. Mech.*, vol. 36, 2000. pp. 1399-1433, .

[27] R. Sahu, K. Patra and J. Szpunar, "Experimental Study and Numerical Modelling of Creep and Stress Relaxation of Dielectric Elastomers," *Strain*, vol. 51, 2015. pp. 43-54, .

[28] M. Kaestner, G. Haasemann and V. Ulbricht, "Multiscale XFEM-modelling and simulation of the inelastic material behaviour of textile-reinforced polymers," *Int J Numer Methods Eng*, vol. 86, 2011. pp. 477-498, .

[29] R. Sudduth, "Indications that the yield point at constant strain rate and the inception of tertiary creep are manifestations of the same failure criterion using the universal viscoelastic model," *J. Mater. Sci.*, vol. 38, 2003. pp. 1123-1134, .

[30] T. M. Atanackovic, "A modified Zener model of a viscoelastic body," *Continuum Mech Therm*, vol. 14, 2002. pp. 137-148, .

[31] L. Macskási, "Mit kell tudni a polimerek/műanyagok reológiájáról? I. Elmélet és mérés technika," *Műanyag És Gumi*, vol. 48, 2011. pp. 24-29, .

- [32] G. W. Ehrenstein and S. Pongratz, "Part 1: Principles of aging," in *Resistance and Stability of Polymers*, G. W. Ehrenstein and S. Pongratz, Eds. Hanser, 2013, pp. 1-138.
- [33] T. Bárány, "A termoplasztikus poliészterek öregedésének meghatározása lényegi törésmunka módszerrel," 2004.
- [34] J. R. White, "Polymer ageing: physics, chemistry or engineering? Time to reflect," *C. R. Chim.*, vol. 9, 2006. pp. 1396-1408, .
- [35] E. Bystritskaya, A. Pomerantsev and O. Rodionova, "Prediction of the aging of polymer materials," *Chemometrics Intellig. Lab. Syst.*, vol. 47, 1999. pp. 175-178, .
- [36] K. K. Biswas and S. Somiya, "Study of the effect of aging progression on creep behavior of PPE composites," *Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol. 3, 1999. pp. 335-350, .
- [37] L. Nicholson, K. Whitley and T. Gates, "The combined influence of molecular weight and temperature on the physical aging and creep compliance of a glassy thermoplastic polyimide," *Mech. Time-Depend. Mater.*, vol. 5, 2001. pp. 199-227, .
- [38] D. Leveque, A. Schieffer, A. Mavel and J. Maire, "Analysis of how thermal aging affects the long-term mechanical behavior and strength of polymer-matrix composites," *Composites Sci. Technol.*, vol. 65, 2005. pp. 395-401, .
- [39] K. Y. Zheng, J. Dong, X. Q. Zeng and W. J. Ding, "Effect of pre-deformation on aging characteristics and mechanical properties of a Mg-Gd-Nd-Zr alloy," *Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.*, vol. 491, 2008. pp. 103-109, .
- [40] J. Attwood, M. Philip, A. Hulme, G. Williams and P. Shipton, "The effects of ageing by ultraviolet degradation of recycled polyolefin blends," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 91, 2006. pp. 3407-3415, .
- [41] J. Gulmine, P. Janissek, H. Heise and L. Akcelrud, "Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 79, 2003. pp. 385-397, .

- [42] N. T. Dintcheva, G. Filippone, F. P. La Mantia and D. Acierno, "Photo-oxidation behaviour of polyethylene/polyamide 6 blends filled with organomodified clay: Improvement of the photo-resistance through morphology modification," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 95, 2010. pp. 527-535, .
- [43] A. Arvidsson and J. White, "Densification of polystyrene under ultraviolet irradiation," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 20, 2001. pp. 2089-2090, .
- [44] F. Gul-E-Noor, M. A. Khan, S. Ghoshal, R. A. Khan, R. A. Mazid and A. M. S. Chowdhury, "Effect of Urea on the Mechanical Properties of Gelatin Films Photocured with 2-Ethylhexyl Acrylate," *J. Polym. Environ.*, vol. 18, 2010. pp. 224-230, .
- [45] F. Carrasco, P. Pages, S. Pascual and X. Colom, "Artificial aging of high-density polyethylene by ultraviolet irradiation," *European Polymer Journal*, vol. 37, 2001. pp. 1457-1464, .
- [46] M. Nowicki, A. Richter, B. Wolf and H. Kaczmarek, "Nanoscale mechanical properties of polymers irradiated by UV," *Polymer*, vol. 44, 2003. pp. 6599-6606, .
- [47] A. Shyichuk, T. Turton, J. White and I. Syrotynska, "Different degradability of two similar polypropylenes as revealed by macromolecule scission and crosslinking rates," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 86, 2004. pp. 377-383, .
- [48] I. Kyrikou and D. Briassoulis, "Biodegradation of agricultural plastic films: A critical review," *J. Polym. Environ.*, vol. 15, 2007. pp. 125-150, .
- [49] R. Jayasekara, I. Harding, I. Bowater and G. Lonergan, "Biodegradability of a selected range of polymers and polymer blends and standard methods for assessment of biodegradation," *J. Polym. Environ.*, vol. 13, 2005. pp. 231-251, .
- [50] G. Szarka, "A poli(vinil-klorid) környezetileg előnyös termooxidatív átalakítása," 2012.
- [51] I. Jakubowicz, "Effects of artificial and natural ageing on impact-modified poly(vinyl chloride) (PVC)," *Polym. Test.*, vol. 20, 2001. pp. 545-551, .

- [52] S. Patrick, *Practical Guide to Polyvinyl Chloride*. iSmithers Rapra Publishing, 2005.
- [53] M. Ito and K. Nagai, "Analysis of degradation mechanism of plasticized PVC under artificial aging conditions," *Polym Degrad Stabil*, vol. 92, 2007. pp. 260-270, .
- [54] S. El Raghi, R. Zahran and B. Gebril, "Effect of weathering on some properties of polyvinyl chloride/lignin blends," *Mater Lett*, vol. 46, 2000. pp. 332-342, .
- [55] G. Scott and M. Tahan, "The photo-oxidation of PVC and impact modified PVC. Physical and mechanical changes," *European Polymer Journal*, vol. 13, 1977. pp. 997-1005, .
- [56] D. Feldman, "Polymer weathering: Photo-oxidation," *J. Polym. Environ.*, vol. 10, 2002. pp. 163-173, .
- [57] L. Real and J. Gardette, "Ageing and characterisation of PVC-based compounds utilised for exterior applications in the building construction field 2: Artificial accelerated ageing with xenon light," *Polym. Test.*, vol. 20, 2001. pp. 789-794, .
- [58] C. A. D'Aquino, W. Balmant, R. L. L. Ribeiro, M. Munaro, J. V. C. Vargas and S. C. Amico, "A simplified mathematical model to predict PVC photodegradation in photobioreactors," *Polym. Test.*, vol. 31, 2012. pp. 638-644, .
- [59] L. M. Matuana, D. P. Kamdem and J. Zhang, "Photoaging and stabilization of rigid PVC/wood-fiber composites," *J Appl Polym Sci*, vol. 80, 2001. pp. 1943-1950, .
- [60] N. Sombatsompop and K. Sungsanit, "Structural changes and mechanical performance of recycled poly (vinyl chloride) bottles exposed to ultraviolet light at 313 nm," *J Appl Polym Sci*, vol. 92, 2004. pp. 84-94, .
- [61] N. Yarahmadi, I. Jakubowicz and T. Hjertberg, "The effects of heat treatment and ageing on the mechanical properties of rigid PVC," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 82, 2003. pp. 59-72, .
- [62] B. Read, G. Dean, P. Tomlind and J. Lesniarekhamid, "Physical Aging and Creep in Pvc," *Polymer*, vol. 33, 1992. pp. 2689-2698, .

- [63] B. Read, G. Dean and P. Tomlins, "Creep and Physical Aging of Pvc - Dependence on Stress and Temperature," *J. Non Cryst. Solids*, vol. 172, 1994. pp. 562-568, .
- [64] L. Real and J. Gardette, "Ageing and characterisation of PVC-based compounds utilised for exterior applications in the building construction field 1: Thermal ageing," *Polym. Test.*, vol. 20, 2001. pp. 779-787, .
- [65] H. Djidjelli, M. Kaci, T. Sadoun, D. Benachour, J. Farenc and J. Martinez-Vega, "Effect of hydrothermic ageing on dielectric and mechanical properties of rigid poly (vinyl chloride)," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 286, 2001. pp. 407-411, .
- [66] A. Demcenko, R. Akkerman, P. B. Nagy and R. Loendersloot, "Non-collinear wave mixing for non-linear ultrasonic detection of physical ageing in PVC," *NDT E Int.*, vol. 49, 2012. pp. 34-39, .
- [67] E. J. Barbero and K. J. Ford, "Equivalent time temperature model for physical aging and temperature effects on polymer creep and relaxation," *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 126, 2004. pp. 413-419, .
- [68] M. Brebu, C. Vasile, S. Antonie, M. Chiriac, M. Precup, J. Yang and C. Roy, "Study of the natural ageing of PVC insulation for electrical cables," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 67, 2000. pp. 209-221, .
- [69] A. Mousa, U. S. Ishiaku and Z. Ishak, "Rheological and mechanical properties of dynamically cured poly (vinyl chloride)/nitrile butadiene rubber thermoplastic elastomers," *Polym. Int.*, vol. 52, 2003. pp. 120-125, .
- [70] H. A. Visser, T. C. Bor, M. Wolters, J. G. Wismans and L. E. Govaert, "Lifetime Assessment of Load-Bearing Polymer Glasses: The Influence of Physical Ageing," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 295, 2010. pp. 1066-1081, .
- [71] D. B. West and R. W. Truss, "Stochastic fatigue limits and fatigue life variability for unplasticised PVC pipes," *Polym. Test.*, vol. 31, 2012. pp. 209-216, .
- [72] D. B. West and R. W. Truss, "Stochastic fatigue limits and fatigue life variability in oriented-PVC pipe," *Polym. Test.*, vol. 31, 2012. pp. 304-311, .

- [73] M. Mock Carroll, "Polyvinylchloride (PVC) pipe reliability and failure modes," *Reliability Engineering*, vol. 13, 1985. pp. 11-21, .
- [74] L. Laiarinandrasana, E. Gaudichet, S. Oberti and C. Devilhers, "Effects of aging on the creep behaviour and residual lifetime assessment of polyvinyl chloride (PVC) pipes," *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 88, 2011. pp. 99-108, .
- [75] Y. Hu, J. Summers, A. Hiltner and E. Baer, "Correlation of fatigue and creep crack growth in poly(vinyl chloride)," *J. Mater. Sci.*, vol. 38, 2003. pp. 633-642, .
- [76] P. M. Belotserkovskii, "Transient vibration of an infinite string bearing a concentrated mass and supported by elastic-viscous suspensions," *Pmm-J. Appl. Math. Mech.*, vol. 75, 2011. pp. 553-559, .
- [77] J. Limaco, H. R. Clark and L. A. Medeiros, "Vibrations of elastic string with nonhomogeneous material," *J. Math. Anal. Appl.*, vol. 344, 2008. pp. 806-820, .
- [78] A. Alsahlani and R. Mukherjee, "Vibration of a string wrapping and unwrapping around an obstacle," *J. Sound Vibrat.*, vol. 329, 2010. pp. 2707-2715, .
- [79] Y. Li, D. Aron and C. Rahn, "Adaptive vibration isolation for axially moving strings: theory and experiment," *Automatica*, vol. 38, 2002. pp. 379-390, .
- [80] Q. C. Nguyen and K. Hong, "Simultaneous control of longitudinal and transverse vibrations of an axially moving string with velocity tracking," *J. Sound Vibrat.*, vol. 331, 2012. pp. 3006-3019, .
- [81] A. Alsahlani, F. B. Mathis and R. Mukherjee, "Vibration suppression of a string through cyclic application and removal of constraints," *J. Sound Vibrat.*, vol. 331, 2012. pp. 4395-4405, .
- [82] E. W. Chen and N. S. Ferguson, "Analysis of energy dissipation in an elastic moving string with a viscous damper at one end," *J. Sound Vibrat.*, vol. 333, 2014. pp. 2556-2570, .

- [83] A. A. Malashin, "Waves and vibrations in strings with windings Commemorating the 100th anniversary of the birth of Kh.A. Rakhmatulin," *Pmm-J. Appl. Math. Mech.*, vol. 75, 2011. pp. 69-72, .
- [84] A. Stulov and D. Kartofelev, "Vibration of strings with nonlinear supports," *Appl. Acoust.*, vol. 76, 2014. pp. 223-229, .
- [85] W. Zhu and N. Zheng, "Exact response of a translating string with arbitrarily varying length under general excitation," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 75, 2008. pp. 031003, .
- [86] T. Noguchi, E. Obataya and K. Ando, "Effects of aging on the vibrational properties of wood," *J. Cult. Herit.*, vol. 13, 2012. pp. S21-S25, .
- [87] P. Drozyner, "Determining the limits of piping vibration," *Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance*, vol. 46, 2011. pp. 97-103, .
- [88] K. Simola, U. Pulkkinen, H. Talja, P. Karjalainen-Roikonen and A. Saarenheimo, "Comparison of approaches for estimating pipe rupture frequencies for risk-informed in-service inspections," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 84, 2004. pp. 65-74, .
- [89] N. Sukaih, "A practical, systematic and structured approach to piping vibration assessment," *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 79, 2002. pp. 597-609, .
- [90] S. Li, Y. Wen, P. Li, J. Yang, X. Dong and Y. Mu, "Leak location in gas pipelines using cross-time-frequency spectrum of leakage-induced acoustic vibrations," *J. Sound Vibrat.*, vol. 333, 2014. pp. 3889-3903, .
- [91] L. I. Raggio, J. Etcheverry, G. Sánchez and N. Bonadeo, "Error analysis of the impulse excitation of vibration measurement of acoustic velocities in steel samples," *Physics Procedia*, vol. 3, 2010. pp. 297-303, .
- [92] N. Hosoya, I. Kajiwarra and T. Hosokawa, "Vibration testing based on impulse response excited by pulsed-laser ablation: Measurement of frequency response function with detection-free input," *J. Sound Vibrat.*, vol. 331, 2012. pp. 1355-1365, .

- [93] S. Dixon, S. E. Burrows, B. Dutton and Y. Fan, "Detection of cracks in metal sheets using pulsed laser generated ultrasound and EMAT detection," *Ultrasonics*, vol. 51, 2011. pp. 7-16, .
- [94] J. Lee, S. Y. Chong, H. Jeong and C. Kong, "A time-of-flight mapping method for laser ultrasound guided in a pipe and its application to wall thinning visualization," *NDT E Int.*, vol. 44, 2011. pp. 680-691, .
- [95] X. H. Wang and D. Redekop, "Natural Frequencies Analysis of Moderately-Thick and Thick Toroidal Shells," *Procedia Engineering*, vol. 14, 2011. pp. 636-640, .
- [96] R. A. Saeed, A. N. Galybin and V. Popov, "3D fluid-structure modelling and vibration analysis for fault diagnosis of Francis turbine using multiple ANN and multiple ANFIS," *Mech. Syst. Signal Proc.*, vol. 34, 2013. pp. 259-276, .
- [97] M. Qing, Zhang Jinghui, Luo Yushan, Wang Haijun and Duan Quan, "Experimental studies of orifice-induced wall pressure fluctuations and pipe vibration," *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 83, 2006. pp. 505-511, .
- [98] M. H. Yas and N. Samadi, "Free vibrations and buckling analysis of carbon nanotube-reinforced composite Timoshenko beams on elastic foundation," *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 98, 2012. pp. 119-128, .
- [99] Li Shuai-jun, Liu Gong-min and Kong Wei-tao, "Vibration analysis of pipes conveying fluid by transfer matrix method," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 266, 2014. pp. 78-88, .
- [100] H. L. Dai, L. Wang, Q. Qian and J. Gan, "Vibration analysis of three-dimensional pipes conveying fluid with consideration of steady combined force by transfer matrix method," *Appl. Math. Comput.*, vol. 219, 2012. pp. 2453-2464, .
- [101] W. H. Semke, G. D. Bibel, S. Jerath, S. B. Gurav and A. L. Webster, "Efficient dynamic structural response modelling of bolted flange piping systems," *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 83, 2006. pp. 767-776, .
- [102] A. Mattheis, M. Trobitz, K. Kussmaul, K. Kerkhof, R. Bonn and K. Beyer, "Diagnostics of piping by ambient vibration analysis," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 198, 2000. pp. 131-140, .

- [103] G. Pezzin, "Rheology and plasticization of polyvinyl chloride," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 26, 1971. pp. 241-256, .
- [104] A. Elicegui, J. delVal, V. Bellenger and J. Verdu, "A study of plasticization effects in poly(vinyl chloride)," *Polymer*, vol. 38, 1997. pp. 1647-1657, .
- [105] V. Devasenapathi, P. Monish and S. B. Prabu, "Experimental investigation of tensile creep behavior of polymer nanocomposites," *Int J Adv Manuf Tech*, vol. 44, 2009. pp. 412-418, .
- [106] I. Fouda, M. El-Tonsy and A. Shaban, "Evaluation of the structural behaviour of annealed nylon 6 fibres from density measurements," *J. Mater. Sci.*, vol. 26, 1991. pp. 5085-5092, .
- [107] P. Ván and Z. Szarka, "Rock rheology - time dependence of dilation and stress around a tunnel," in *Eurock 2006: Multiphysics Coupling and Long Term Behaviour in Rock Mechanics*, A. van Cotthem, R. Charlier, J. Thimus and J. Tshibangu, Eds. London: Taylor & Francis Group, 2006, pp. 357.
- [108] T. Fülöp and G. Béda, "Rheological dynamics of tunnels - an analytical investigation," in *Rock Engineering in Difficult Ground Conditions: Soft Rocks and Karst*, I. Vrkljan, Ed. London: Taylor & Francis Group, 2010, pp. 441.
- [109] E. J. Barbero, *Finite Element Analysis of Composite Materials*. Boca Raton: CRC, 2007.
- [110] L. P. Real, A. P. Rocha and J. Gardette, "Artificial accelerated weathering of poly (vinyl chloride) for outdoor applications: the evolution of the mechanical and molecular properties," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 82, 2003. pp. 235-243, .
- [111] J. Wachel, S. J. Morton and K. E. Atkins, "Piping vibration analysis," in *Proceedings of the 19th Turbomachinery Symposium*, 1990, pp. 119-134.
- [112] T. Bajcar, F. Cimerman, B. Sirok and M. Amersek, "Impact assessment of traffic-induced vibration on natural gas transmission pipeline," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 25, 2012. pp. 1055-1068, .

[113] J. Liu, T. Li, T. Liu and J. Yan, "Vibration characteristic analysis of buried pipes using the wave propagation approach," *Appl. Acoust.*, vol. 66, 2005. pp. 353-364, .

9. MELLÉKLETEK

A MELLÉKLET

Egytengelyű vizsgálatok esetén a feszültség és a deformáció a következőképpen írható fel.

$$[\mathbf{S}] = \begin{pmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{és} \quad [\mathbf{E}] = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_T \end{pmatrix}$$

Ahol $\varepsilon_{\parallel}$ a hosszirányú (longitudinális) és ε_T a keresztirányú (transzverzális) alakváltozás. A feszültség tenzor és deformáció tenzor felbontható deviatorikus (D-vel jelölt) és gömbi (térfogati) részekre (V-vel jelölt).

$$[\mathbf{S}^D] = \begin{pmatrix} \frac{2}{3}\sigma & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}\sigma & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}\sigma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma^D & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2}\sigma^D & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2}\sigma^D \end{pmatrix}$$

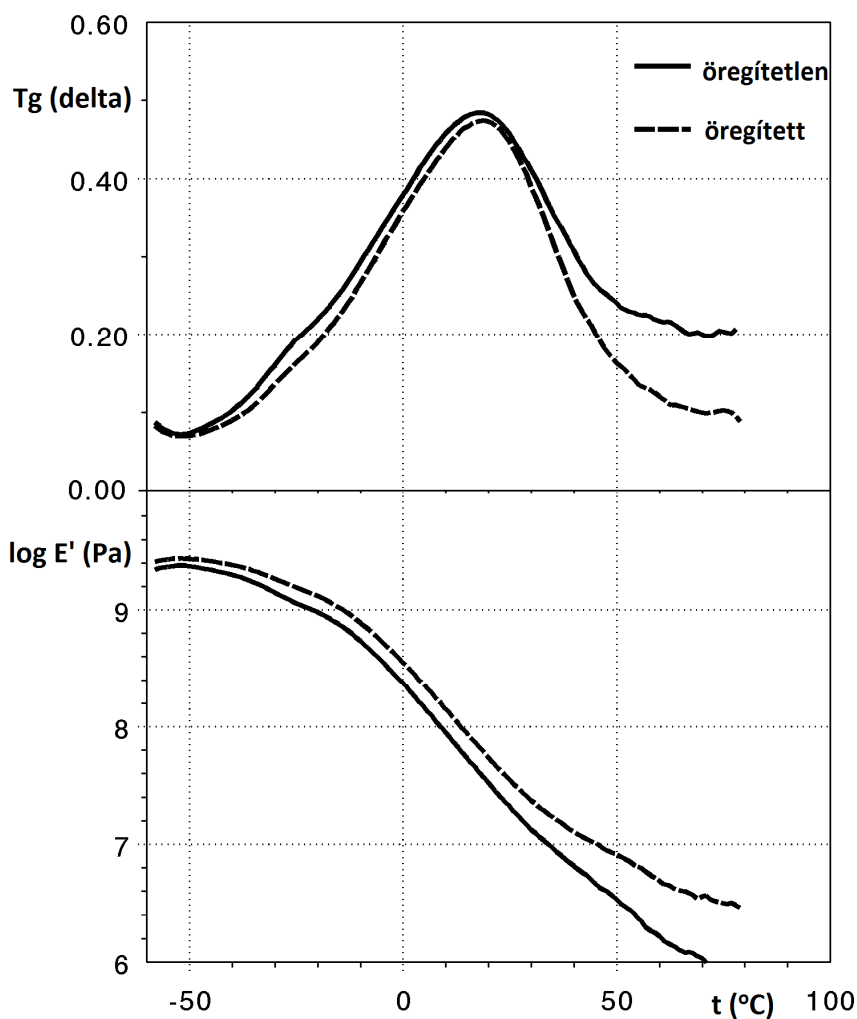
$$[\mathbf{S}^V] = \begin{pmatrix} \frac{1}{3}\sigma & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3}\sigma & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}\sigma \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \sigma^V & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^V & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^V \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 [\mathbf{E}^D] &= \begin{pmatrix} \frac{2}{3}(\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_T) & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}(\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_T) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}(\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_T) \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \varepsilon^D & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2}\varepsilon^D & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2}\varepsilon^D \end{pmatrix} \\
 [\mathbf{E}^V] &= \begin{pmatrix} \frac{1}{3}(\varepsilon_{\parallel} + 2\varepsilon_T) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3}(\varepsilon_{\parallel} + 2\varepsilon_T) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}(\varepsilon_{\parallel} + 2\varepsilon_T) \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \varepsilon^V & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon^V & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon^V \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

B MELLÉKLET

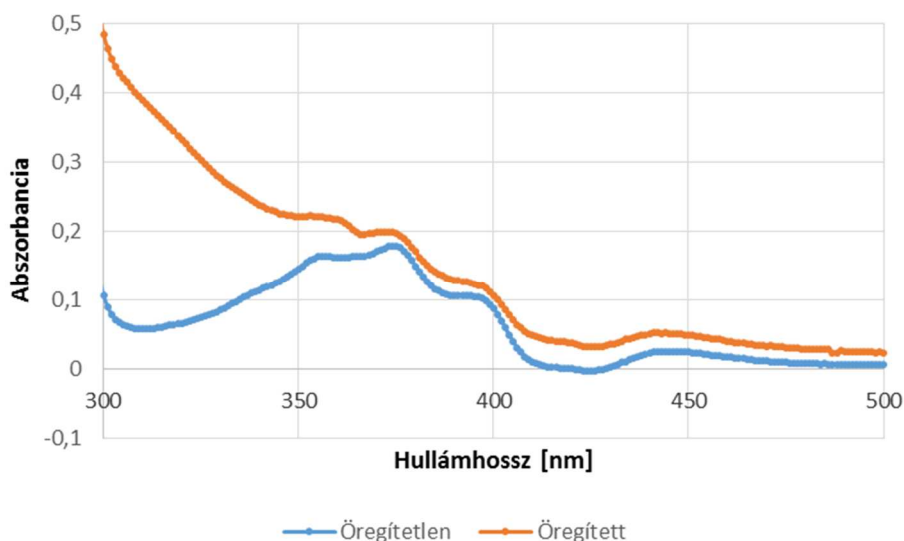
DMA (Dynamic-mechanical analysis) vizsgálat

8 mm átmérőjű PVC szálak közül egy öregítetlen és egy 4000 óráig öregített szál képezte a vizsgálat tárgyát, melyekből 1 cm széles 1 mm vastag próbatestek készültek. A mérés 1 Hz frekvencián, 64 mikrométer csúctól-csúcsig deformációval lett felvéve, 2°C/perc fűtési sebességgel. Műszer: Rheometrics Scientific MK-III, dual cantilever mode.

**20. ábra** DMA vizsgálat eredménye

Fotometriás vizsgálat

A fotometriás vizsgálatot 2 mm átmérőjű öregítetlen és 2200 óráig öregített PVC szálakon végeztük el. A próbatestekből különböző töménységű tetrahidrofurános (Spectrosol, Scharlau) oldatot készítettünk és a méréseket HP 8453 UV-VIS diódasoros spektrofotométerrel végeztük. Általánosságban a 300 - 500 nm tartományban látható az öregítés hatása illetve az is, hogy az öregítetlen anyag is tartalmaz degradált részeket. A 21. ábrán 0,66 (m/m)%-os oldatok mérési eredményei láthatóak öregítetlen illetve öregített PVC esetében.



21. ábra Öregített és öregítetlen PVC próbatestek tetrahidrofurános oldatainak spektruma

10. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra	A kísérleti rendszer vázlatos képe	18
2. ábra	Képek a kísérleti rendszerről.....	19
3. ábra	Az öregítő kamra egy öregítési sorozathoz tartozó három PVC szállal	21
4. ábra	A kísérleti rendszer oldalnézetben	23
5. ábra	A mérési rendszer vázlata	26
6. ábra	A csőszakasz megfogása és a rezgésérzékelők elhelyezkedése (rozsdamentes acélcső)	26
7. ábra	A rozsdamentes acélcső az esztergapadon történő forgatás közben, valamint az első cementesztrich réteg felvitele utáni állapotban	28
8. ábra	Egy és két exponenciális görbeillesztés egy próbatest (2öregített2) példáján.....	31
9. ábra	Paraméterekből számított görbék és a mérési pontok kúszásra vonatkozóan (x tengely: $t[s]$; y tengely ϵ^d)	34
10. ábra	Egy és két exponenciális görbeillesztés a relaxáció első szakaszára történő nagyítással (2ö2 próbatest).....	36
11. ábra	Paraméterekből számított görbék és a mérési pontok relaxációra vonatkozóan (x tengely: $t[s]$; y tengely $\sigma^d[kPa]$).....	40
12. ábra	Kitérések változása az öregítési idő függvényében.....	43
13. ábra	A szálak kitéréseinek átlagértékei az idő függvényében a pendítést követően	44
14. ábra	A két különböző illesztés eredménye egy öregítetlen (index: 03) próbatest példáján	46
15. ábra	A VEM rendszer felépítése (rozsdamentes acélcső)	51
16. ábra	A gumis megfogás elemei (fix csomópontokkal a külső felületen).....	51
17. ábra	Mért gyorsulásértékek x irányban (folytonos vonal gyorsulásmérő 1 (acc. 1.); pontozott szaggatott gyorsulásmérő 2 (acc. 2.); rozsdm. acélcső)	53
18. ábra	A középső gyorsulásmérő (acc. 1) által függőleges (x) irányban kapott FFT spektrum (rozsdamentes acélcső).....	55
19. ábra	A longitudinális rezgés első három modusa (VEM alapján).....	56
20. ábra	DMA vizsgálat eredménye.....	87
21. ábra	Öregített és öregítetlen PVC próbatestek tetrahidrofurános oldatainak spektruma	88

11. TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat Anyagmodellek	5
2. táblázat LE-411/009 lágy PVC granulátum összetétele (tömeg %)	16
3. táblázat LE-411/009 lágy PVC mechanikai tulajdonságai.....	17
4. táblázat A kísérlet szakaszai	20
5. táblázat Betonozás következtében csökkenő belső átmérő értékek és a réteg képzése során alkalmazott fordulatszám	27
6. táblázat Kúszási szakaszra számított paraméterértékek	32
7. táblázat Mért és modellezett adatpárok átlagos abszolút eltérése (ÁAE) és R^2 értékei (mérési ε^d értékek min: 0,1054 max: 0,2071; modellezett ε^d értékek min: 0,1083 max: 0,2042)	33
8. táblázat A kúszásra vonatkozó számított átlag és korrigált szórás értékek az öregítési idő függvényében	35
9. táblázat Relaxációra számított paraméterértékek.....	38
10. táblázat Mért és modellezett adatpárok átlagos abszolút eltérése (ÁAE) és az R^2 értékek (mérési σ^d értékek min: 616,86 kPa max: 865,76 kPa; modellezett σ^d értékek min: 617,82 kPa max: 868,37 kPa)	39
11. táblázat A relaxációra vonatkozó számított átlag és korrigált szórás értékek az öregítési idő függvényében	40
12. táblázat Kitérések átlagértékei és korrigált szórás értékek az öregítési idő függvényében	42
13. táblázat Logaritmikus dekrementum értékek az öregítési idő függvényében	43
14. táblázat A vizsgált paraméterek átlagértékei.....	47
15. táblázat A modellszámítás során használt anyagtulajdonság értékek (rozsdamentes acélcső)	52
16. táblázat Jellemző rezgésparaméter értékek átlagai azonos gerjesztés mellett (acc. 1, x irány) (reozsdamentes acélcső és PVC cső esetén)	56
17. táblázat A rendszer három legalacsonyabb longitudinális sajátfrekvenciája különböző cementesztrich rétegvastagság mellett (VEM).....	57
18. táblázat A longitudinális rezgés első sajátfrekvenciáinak és a λ korrekciós faktornak az értékei (rozsdamentes acélcső).....	58