

Biológiai folyamatok modellezése ivóvízellátó rendszerekben

Modelling of biological processes in water distribution systems

VÁRSZEGI Bence, Dr. HŐS Csaba

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék, 1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3. D. épület 3. emelet, Tel.: 06-1-463-16-80, www.hds.bme.hu

Abstract

The subject of this paper is to examine how microscopic organisms (such as bacteria, protozoans etc.) spread in water distribution systems. Modelling the microbiology and hydraulics of such systems aims to reveal the weak spots (where pathogens might accumulate) and possible development opportunities (e.g. optimise chlorination). In water distribution systems microorganisms are mostly located in structures called biofilms on pipes' walls. The model presented estimates the concentrations of microorganisms and nutrients using time-dependent convective-diffusive equations.

Keywords: biofilm, drinking water distribution system, biological model, logistic equation, convective-diffusive equation

Kivonat

A tanulmány tárgya ivóvízellátó hálózatok biológiai viselkedésének feltárása – a csővezetékrendszerben előforduló mikroorganizmusok (baktériumok, protozoák stb.) terjedésének szempontjából. Ivóvízhálózatokban a mikroorganizmusok a csővezeték belső felületén kialakuló ún. biofilmben helyezkednek el és komplex kapcsolatban vannak a víztestben jelenlévő tápanyagokkal és mikroorganizmusokkal. A cikkben egy olyan biológiai modellt ismertetek, mely a víztestben és a biofilmben található mikroorganizmus- és tápanyagkoncentrációra ad becslést konvektív-diffúzív időfüggő egyenleteken keresztül.

Kulcsszavak: biofilm, ivóvízhálózat, biológiai modell, logisztikai egyenlet, konvektív-diffúzív egyenlet

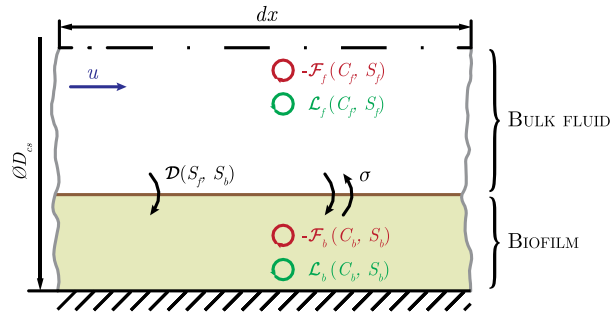
1. BEVEZETÉS

Ivóvízellátó hálózatok a modern települések alapvető infrastruktúrái, melyek megfelelő és biztonságos üzemeltetése elsődleges fontosságú. Tervezésük és rekonstrukciójuk során a megfelelő vízminőség biztosítása elsődleges szempont, melyhez nagy segítséges adnak a megfelelő pontosságú számítógépes modellek. Az ivóvízhálózatok biológiáját modellező rendszerek viszonylag kezdetlegesek és kevésbé elterjedtek. Ezen írásban egy olyan rendszer alapjait rakjuk le, amely a jövőben reményeink szerint alkalmas lesz nagyméretű ivóvízhálózatokban kialakuló biológiai (biofilm) jelenségek előrejelzésére és az ilyen szempontból kritikus területek meghatározására.

2. A BIOLÓGIAI MODELL BEMUTATÁSA

A kutatás során céloom egy olyan rendszer felépítése volt, mely a cső hossza mentén, axiális irányban képes leírni a mikrobák és a számukra fontos tápanyagok koncentrációjának eloszlását, azok terjedését. Ez tehát egy egydimenziós modell, a biofilm vastagságát konstansnak tekintjük a csővezeték hossza mentén; a változó a csővezeték hosszmenti x koordinátája lesz (ld. [1]). A modell 4 fő részből áll, melyeket 4 differenciálegyenlet ad meg (ld. 1. ábra). A vizsgált rendszert két részre osztjuk: egyrészt maga a folyadék, mely a mikrobákat eleve tartalmazza, másrészt pedig a kialakuló biofilm. Mindkét rész esetén figyelemmel kísérjük részint a mikroba koncentráció alakulását, részint a mikrobák által fogyasztott szubsztrát koncentrációt.

Leíró egyenletrendszer

1. ábra. A modell által vizsgált folyamatok egy dx hosszúságú csőszakaszban (hosszmetszet)

$$\frac{\partial S_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uS_f) = -D(S_b, S_f) - \mathcal{F}_f(C_f, S_f) \quad (1)$$

A folyadék u , m/s sebességgel áramlik, benne a szubsztrát koncentrációja S_f , g/ml. Felírható (1) transzportegyenlet, melyben a koncentráció csökkenését a biofilm irányába lejátszódó diffúzió $-D(S_b, S_f)$, g/mlh és a tápanyagfogyás $-\mathcal{F}_f(C_f, S_f)$, g/mlh okozza.

$$\frac{\partial S_b}{\partial t} = D(S_b, S_f) - \mathcal{F}_b(C_b, S_b) \quad (2)$$

A biofilmen belül nincsen áramlás, ezért (2) egy közönséges differenciálegyenletté egyszerűsödik. A biofilmben élő baktériumok számára elérhető S_b , g/cm² szubsztrát mennyiség időbeli megváltozását a diffúzió ($D(S_b, S_f)$, g/cm²h) és a tápanyagfogyás ($-\mathcal{F}_b(C_b, S_b)$, g/cm²h) alakítja.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uC_f) = \mathcal{L}_f(C_f, S_f) \quad (3)$$

A folyadékban élő mikrobák koncentrációját (C_f , logTKE/ml) a (3) formulához hasonló módon tudjuk leírni. A szaporodást és fogyasztást leíró mechanizmust \mathcal{L}_f , logTKE/mlh tag írja le.

$$\frac{\partial C_b}{\partial t} = \mathcal{L}_b(C_b, S_b) \pm \sigma(x, t, C_b) \quad (4)$$

A biofilmben élő mikroorganizmusokra is érvényes az a populációdinamika, melyet a folyadéktestre is felírtam (\mathcal{L}_b , logTKE/cm²h). A biofilmbeli koncentrációt emellett az újonnan csatlakozó, illetve leszakadó telepek alakítják ($\pm\sigma(x, t, C_b)$), ld. (4).

A bulk fluidban a különböző tápanyagok és a (mikroorganizmusok szempontjából releváns) szerves komponensek különböző koncentrációban (S_f , logTKE/ml) vannak jelen. (A koncentráció mértékegysége milliliter egységre vetített mikroba szám (TKE - telepképző egység).) Ezek a folyadékárammal (u , m/s) konvektív módon terjednek a vizsgált cső hossza (L , m) mentén. Eközben a fluid és a biofilm között anyagtranszport megy végbe, diffúzió útján. S_b , g/ml jelöli azt a szubsztrát mennyiséget, mely a fluidból a biofilmben diffundált, az ott élő szervezetek számára már közvetlenül elérhető. Bár a valóságban ez a transzport mindkét irányban megvalósulhat (élő szervezetek tápanyagfelvétele, anyagcsere termék távoztása), kezdetben úgy tekintjük, a biofilmben diffundált tápanyagokat az ott élő organizmusok maradéktalanul feldolgozzák és beépítik a szervezetükbe, illetve a biofilm mátrixba. Tápanyag pedig minden esetben kívülről, a beáramló folyadékból érkezik. Jelenleg nem vesszük figyelembe, hogy az elpusztult mikrobák is társaik tápanyagául szolgálhatnak.

Forrásegyenletek

A parciális differenciálegyenletek jobb oldalán lévő forrástagok jelentik a kapcsolatot biofilm és folyadéktest, tápanyagfogyás és szaporodás között.

$$\mathcal{F}_f = \frac{1}{Y_{C/S}} \mu_{f_{max}} \frac{S_f}{K_f + S_f} C_f \quad (5)$$

\mathcal{F}_f forrástag azt fejezi ki, hogy időegység alatt mennyivel változik meg a szubsztrát koncentráció a folyadékban (ld. (5)) – ugyanezen formula felírható a biofilmre is, ez esetben felületre és nem térfogatra fajlagos mennyiségeket tekintünk. Ezen formula a Monod kinetikával egyezik meg, ld. [2][3][4]. $\mu_{f_{max}}$, 1/h a baktériumok maximális növekedési sebességét mutatja meg, K_f , g/ml az adott tápanyag vegyületre vonatkozó telítési állandó. A növekedési együttható, $Y_{C/S}$, g C/g S azt mutatja meg, hogy az elfogyasztott szubsztrát tömegegysége mennyivel növeli meg a létrejövő biomassza tömegét.

$$\mathcal{D} = \frac{12D(S_f - S_b)}{D_{cs}W} \quad (6)$$

A biofilm és a folyadéktest között megvalósuló diffúziót a (6) összefüggés mutatja meg, ahol D_{cs} , mm a vizsgált csőszakasz átmérője, D , mm²/h a diffúziós együttható, W , mm a csőfalon kialakult biofilm réteg vastagsága (ld. [5]).

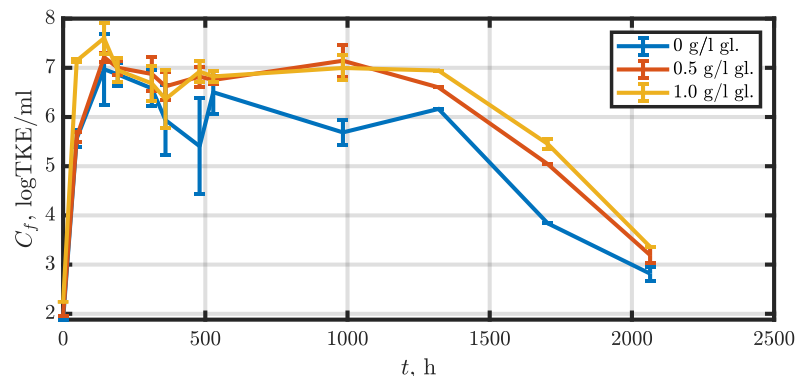
$$\mathcal{L}_f(S, C) = \mu_{f_{max}} \frac{S_f}{K_f + S_f} \left(1 - \frac{C_f}{C_{f_m}}\right) C_f \quad (7)$$

Legyen a mikrobák számának idő szerinti megváltozása \mathcal{L}_f , logTKE/mlh, mely a (7) egyenlet szerint fog alakulni, ahol C_{f_m} , logTKE/ml a folyadékra vonatkozó logisztikai eltartóképesség, a többi mennyiség megegyezik a (5) egyenlet esetében leírtakkal. Ez a formula a logisztikai növekedési egyenlet és a Monod kinetika kombinációja, ld. [6][7]. Ugyanebben a formában felírható a biofilmre is.

3. MÉRÉSEK

Mérésleírás

Az előbbieken kidolgozott modell valóságnak megfelelő viselkedéséhez szükséges paraméterek értékeit laboratóriumi mérések adataiból számítottam ki. A mérés célja annak vizsgálata, hogy a csapvízben eredendően jelenlévő mikroorganizmusok álló vízben milyen gyorsasággal szaporodnak fel - különböző glükóz koncentrációk esetén. A vizet külön nem oltottuk be semmilyen tesztmikrobával, annak élővilága megegyezik a budapesti ivóvízével. Egy minta esetén külön vizsgáltuk a mikrobák koncentrációjának alakulását a folyadékban, illetve a folyadékba helyezett KPE lemezek felületén.

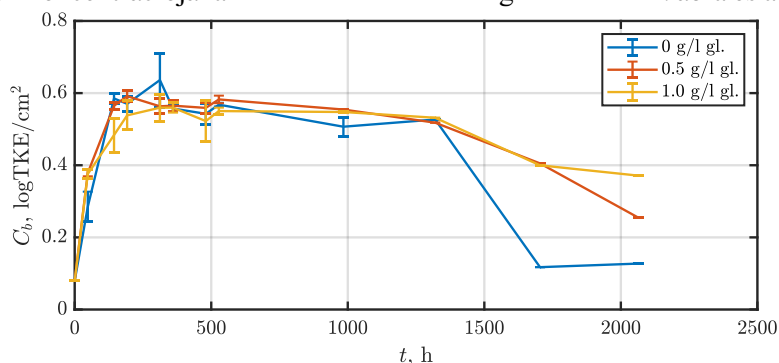


2. ábra Mikroba koncentráció az idő függvényében, különböző szubsztrát koncentrációk esetén a folyadékban

Mérési eredmények, paraméterillesztés

A mintákat szobahőmérsékleten (25 °C-os termosztátban) tároltuk, majd adott időközönként meghatároztuk a folyadékfázis (ivóvíz) és a felületet borító biofilm bevonat mikrobaszámát - R2A tápagarral (Merck) végzett lemezöntéses módszerrel. A tápközegben a mintában lévő mikrobák 1-2 nap alatt szabad

szemmel is látható telepeket növesztenek, melyek immár egyszerűen megszámlálhatóak. A mérésorozat kb. 3 hónapig tartott, a baktériumok koncentrációjának ez idő alatt történt megváltozása a 2. ábra és a 3. ábra látható.



3. ábra - Mikroba koncentráció az idő függvényében, különböző szubsztrát koncentrációk esetén a **biofilmben**

A baktérium koncentráció időbeli alakulása a vízmintában és a lemez felületén nagyon hasonló (2. ábra3. ábra). Egy gyors felfutást követően a telepszám kb. másfél hónapon keresztül stagnál. Ezt követően fokozatos kihalás tapasztalható. A folyadéktest esetében azt láthatjuk, hogy a magasabb glükóztartalmú minták valamivel nagyobb szaporulatot alakítottak ki, de a különbség nem számottevő, a biofilmről vett mintánál alig észrevehető.

A differenciálegyenlet-rendszer paramétereit úgy választottuk meg, hogy az egyenletrendszer megoldása a lehető legkisebb hibával közelítse a mérési adatsort (ld. 1. táblázat).

A modell paramétereit a kimért adatsor alapján. Bal oldalt láthatóak a **folyadéktestre**, jobb oldalon a **biofilmre** érvényes értékek.

1. táblázat

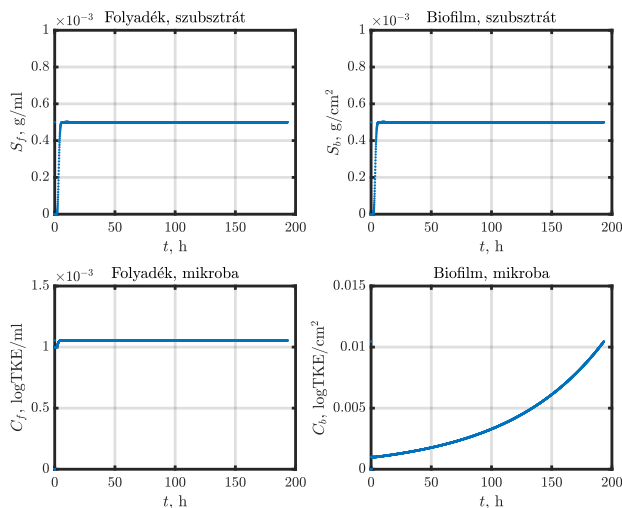
Glükóz koncentráció	0,5 g/l	1,0 g/l	Glükóz koncentráció	0,5 g/l	1,0 g/l
$\mu_f, 1/h$	2017	$2.747 \cdot 10^4$	$\mu_b, 1/h$	7117	4480
$K_f, g/ml$	30,82	568,6	$K_b, g/cm^2$	265,7	504,5
$C_{f_m}, \log TKE/ml$	6,775	6,926	$C_{b_m}, \log TKE/cm^2$	5737	5816
$Y_f, \log TKE/g$	$2,607 \cdot 10^5$	$3,702 \cdot 10^5$	$Y_b, \log TKE/g$	$1,729 \cdot 10^8$	$2,337 \cdot 10^8$

4. A BIOLÓGIAI MODELLEL VÉGZETT SZÁMÍTÁSOK

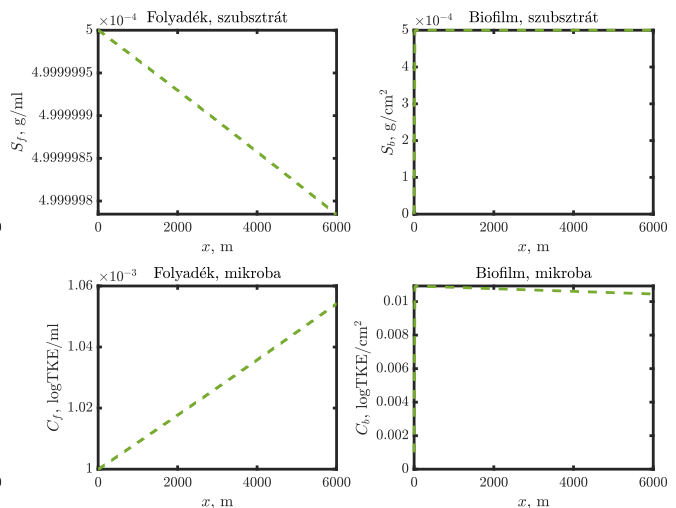
A szimulációk során a (1)-(4) nemlineáris parciális differenciálegyenletet kell megoldanunk numerikusan egy csővezeték hossza mentén. Ez a véges differenciák módszerével történik, a tér- és időbeli diszkretizációhoz rendre centrális differenciasémát, valamint implicit Euler módszert használunk.

A vizsgált csővezeték hossza 6 km, átmérője 1000 mm, benne az ivóvíz áramlási sebessége 1 m/s. A kezdeti glükózkoncentráció 0,5 g/l, a biofilm feltételezett konstans vastagsága 4,6 μm , a diffúziós tényező 3,458 mm/h². A kezdeti időpillanatban a mikroba koncentrációk a teljes cső hossza mentén $C_{f_0} = 0,001 \log TKE/ml$ és $C_{b_0} = 0,001 \log TKE/cm^2$, a szubsztrát koncentráció kezdetben mindenhol zérus. A beömlő keresztmetszeten a folyadék glükóz koncentrációja $S_{f_{LHS}} = 0,5 g/l$.

A szimuláció során azt tapasztalhatjuk, hogy a glükóz koncentráció nagyon gyorsan egy állandó szintre áll be (ld. 4. ábra) folyadéktestben és biofilmben egyaránt. A kettő közötti kis időbeli eltérést a rendkívül gyors diffúzió magyarázza. A rendelkezésre álló glükóz bőven elegendő a mikroorganizmusok szaporodásához, a mikrobaszám korlátok nélkül növekszik. Az 5. ábra látható csőhossz menti eloszlásokon észrevehető a lassú áramlás hatása, bár az nem számottevő. Jóllehet a folyadéktest és a biofilm mikroba koncentrációja dimenziók tekintetében különbözik, azt láthatjuk, hogy a biofilmben dinamikusabb a fejlődés, a növekedés tágabb határok között lehetséges. Ennek biológiai magyarázata lehet, hogy a biofilm kedvezőbb életfeltételeket biztosít a mikrobák számára.



4. ábra - A koncentrációk **időbeli** eloszlása a kiömlő keresztmetszetnél, folyamatos glükózutánpótlás mellett



5. ábra - A koncentrációk **térbeli** eloszlása 200 óra után, folyamatos glükóz utánpótlással

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az itt bemutatott kezdetleges egyenletrendszer integrálható egy ivóvízellátó rendszer hidraulikai modelljébe, emellett tovább bővíthető komplexebb növekedési modellekkel és egyéb folyamatok modellezésével (pl. mikrobák természetes kipisztulása, telepek leszakadása és csatlakozása stb.). A jövőben érdemes lehet különböző egyéb csőanyagokkal (acél, gömbrafitos öntöttvas) elvégezni a méréseket (ld. [8]), esetleg valamilyen célzott tesztmikrobával. További kutatás tárgya lehet, hogy a víz klórtartalma milyen hatással van a biofilm képződésre. Az itt leírt kísérlet álló vízben történt; jelentős többletinformációval szolgálhat egy teszhálózaton történő mérésorozat.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani Kiskó Gabriellának, aki nélkül nem készülhettek volna el a labormérések, illetve Hős Csabának a folyamatos szakmai támogatásért és kritikáért. A munka Dr. Hős Csaba OTKA K-135436 „Biztonságos ivóvízellátó rendszerek” projektjének támogatásával készült.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] M. R. Mattei és tsai. "Continuum and discrete approach in modeling biofilm development and structure: a review". *Journal of Mathematical Biology* 76.4 (2018), 945-1003. old. issn: 14321416. doi: 10.1007/s00285-017-1165-y.
- [2] M. Chakravarty, H. D. Singh és J. N. Baruah. "A kinetic model for microbial growth on liquid hydrocarbons". *Biotechnology and Bioengineering* 17.3 (1975), 399-412. old. issn: 10970290. doi: 10.1002/bit.260170308.
- [3] J Monod. "The Growth of Bacterial Cultures". *Annual Review of Microbiology* 3.1 (1949), 371-394. old. issn: 0066-4227. doi: 10.1146/annurev.mi.03.100149.002103.
- [4] S. Simkins és M. Alexander. "Models for mineralization kinetics with the variables of substrate concentration and population density." *Applied and Environmental Microbiology* 47.6 (1984), 1299-1306. old. issn: 00992240. doi: 10.1128/aem.47.6.1299-1306.1984.
- [5] O. Wanner és W. Gujer. "A multispecies biofilm model". *Biotechnology and Bioengineering* 28.3 (1986), 314-328. old. issn: 10970290. doi: 10.1002/bit.260280304.
- [6] F. Kargi. "Re-interpretation of the logistic equation for batch microbial growth in relation to Monod kinetics". *Letters in Applied Microbiology* 48.4 (2009), 398-401. old. issn: 02668254. doi: 10.1111/j.1472-765X.2008.02537.x.
- [7] P.F. Verhulst. "Recherches mathematiques sur la loi d'accroissement de la population". *L'Academie Royale des Sci. Et Belles-Lettres de Bruxelles* 18 (1844), 1-41. old.
- [8] Débora Cristina Vidal De Oliveira és tsai. "Ability of salmonella spp. to produce biofilm is dependent on temperature and surface material". *Foodborne Pathogens and Disease* 11.6 (2014), 478-483. old. issn: 15567125. doi: 10.1089/fpd.2013.1710.