

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	1
1. A dolgozat problémaköre célkitűzése.....	4
1.1. Problémakör, aktualitás, kutatási terület.....	4
1.2. A kutatástól várt eredmények és azok szerepe a gyakorlatban.....	4
1.3. A dolgozatban megjelenő jelölések, nyelvezet.....	6
2. Membránszűrők alkalmazása és jellemző igénybevételei szennyvíztisztításnál.....	8
2.1. A membránszűrés jelentősége és előnyei.....	8
2.2. A szennyvíztisztítás elvi folyamata membránszűrés esetén.....	9
2.2.1. Az aktívszén és a polimerek a szennyvízkezelésben.....	9
2.2.2. A polimerek szerepe a koagulálásban.....	10
2.2.3. Membránok alkalmazása a szűrés technológiában.....	12
3. A Jellegzetes tönkremeneteli formák fémes és nemfémes szerkezeteknél.....	17
3.1. A tönkremenetel definíciója, tönkremeneteli határállapot.....	17
3.2. A kopás.....	20
3.2.1. Kopás szárazsúrlódással.....	20
3.2.2. Vegyes kopási folyamatok.....	22
3.2.3. Az egyenértékű üzemidő fogalmának bevezetése a kopásintenzitás értelmezésével.....	22
3.3. Kifáradás.....	25
3.4. Törés.....	25
3.5. Korrózió.....	27
3.5.1. A korrózió fajtái.....	27
3.5.2. A korrózió megjelenési formái.....	27
3.6. Polimerek jellegzetes mikroszerkezeti tönkremenetele.....	28
3.6.1. A polimerek öregedésének okai.....	29
3.6.2. A polimerek öregedésének lehetséges mechanizmusai.....	30
4. Az élettartam számszerűsítése és az általánosan elterjedt élettartam-elemzési módszerek.....	32
4.1. Az élettartam és a terhelés összefüggése.....	32
4.1.1. Tervezési megközelítések.....	32
4.1.2. A tönkremenetelek fárasztási ciklusok szerinti felosztása.....	33
4.1.3. Az élettartamot statisztikailag jellemző függvények és becslésük valós adatokból.....	34
4.2. Az élettartam-adatok jellegzetes statisztikai eloszlása.....	36
4.2.1. Egyedek exponenciális eloszlású élettartam adatokkal.....	36

4.2.2. Egyedek Weibull eloszlású élettartam adatokkal	37
4.2.3. Egyedek normál eloszlású élettartam adatokkal	42
4.2.4. A lognormális eloszlás megjelenése	44
4.2.5. Az állományfüggvényekből becsült függvények és más mérőszámok.....	45
4.3. Az élettartam vizsgálatok felosztása és általános menete	46
4.3.1. Valós idejű élettartam vizsgálatok	46
4.3.2. Gyorsított vizsgálatok	47
5. Membránszűrők elhasználódása és az általános rutinvizsgálatok a funkció ellátására	50
5.1. Szennyvíztisztításra alkalmazott membránszűrők elhasználódása	50
5.2. Az élettartamot meghatározó paraméterek a víztisztító membránszűrőknél	51
5.2.1. A fluxus	51
5.2.2. Statikus öregítő hatások a szűrők élettartamára.....	52
5.2.3. Dinamikus öregítő hatások a szűrők élettartamára	57
5.3. Vizsgálati formák és azok kategorizálása	59
5.3.1. Megközelítések a vizsgálatok besorolására (in-, on-, és off-line mérések).....	59
5.3.2. Az in-, on-, off-line vizsgálatok a szűrési folyamat során.....	60
5.4. A szűrők diagnosztikája az üzemeltetési gyakorlatban	61
5.5. A vizsgálatokra épülő elemzések	62
6. Fogalmak bevezetése az elemzési metodika kidolgozásához	64
6.1. Terhelést és élettartamot is kifejező egységesített fogalomrendszer bevezetése membránszűrőkre	64
6.1.1. Az „élettartam klórterhelés” fogalmának bevezetése és számítása	64
6.1.2. Az „egyenértékű működési idő” fogalma és meghatározásának modellje.....	66
6.1.3. Az „igénybevételi arculat” fogalmának bevezetése.....	67
6.2. Az élettartam-profil jelentése, kialakításának általános elvei	69
7. Az élettartam adatok feldolgozási módszerének elvi kialakítása és megvalósítása.....	71
7.1. Az élettartam kifejezésének megközelítései, becslési technikáinak problémái	71
7.2. A „tételhatár” problematikája az elemzésekben.....	73
7.2.1. A tételhatár kialakulása a gyártás és kibocsátás során	73
7.2.2. A tételhatár megjelenése az információszerzésnél a működtetési fázis során	73
7.2.3. A tételhatár megjelenése az élettartam adatok gyűjtésekor a működés végén	74
7.3. Az adatok részvétele és kezelése az elemzésekben és a „felejtő” mechanizmus	74
7.4. Az élettartam adatbázis elvi kialakítása	75
7.4.1. Az élettartam adatbázis kialakításának szempontjai	76
7.4.2. Az elemzések bemeneti adatainak kategorizálása	76

7.5. Az igénybevételi arculat meghatározása.....	79
7.5.1. A tervezett igénybevételek	80
7.5.2. Valószínűsíthető körülményekhez kötődő igénybevételek	80
7.5.3. A valószínűsíthető együttállásokból eredő hatások	81
7.5.4. A „KO” paraméterek kijelölésének javasolt módszere	82
8. A módszerrel nyert gyakorlati adatok elemzése	86
8.1. Elérendő célok az összegyűjtött élettartam adatok felhasználásával.....	86
8.2. Élettartam adatbázis modell kialakítása, tervezett tartalma és használatának feltételei szennyvíztisztító membránszűrőknél.....	87
8.3. A élettartam értékelések alapján történő műszaki és minőségügyi szabályozás.....	89
8.4. A kialakított adatbázis felépítése	90
8.4.1. Az adatbázis által vezetett ADATOK és kezelésük.....	91
8.4.2. Az adatbázis által vezetett VÁLTOZÓK és kezelésük	92
8.4.3. Az adatbázis által kezelt „MEGJEGYZÉSEK”	98
8.4.4. Az adatbázis fejlesztési lehetőségei	98
8.5. Élettartam vizsgálatok az adatbázisból nyert adatok felhasználásával	100
8.5.1. Összefüggések elemzése az élettartam és a klórterhelés közt	100
8.5.2. Weibull elemzések az újszerű élettartam jellemzőkkel	103
9. Végkövetkeztetések, a továbbfejlesztés lehetőségei	109
10. A dolgozat tézisei	111
Irodalomjegyzék.....	115
Mellékletek	121

1. A dolgozat problémaköre célkitűzése

1.1. Problémakör, aktualitás, kutatási terület

A dolgozat alapvetően élettartam elemzések problémájával foglalkozik, amelynek egy membránszűrőket gyártó, a világ vezető vállalkozásai között számon tartott cég ad teret és lehetőséget a problémák megismerésére és az elemzésekre. A széles körben megoldást kínáló termékválasztékból csak az szennyvíztisztításban használt ultraszűrő csőmembránok területén vizsgálódunk, de a megállapításaink, módszereink valamennyi területen a szükséges adaptációkat elvégezve érvényesnek tekinthetők és alkalmazhatóak.

Magyarországon a szennyvíztisztítás aránylag kis területét teszi ki a membránszűrési technológia alkalmazása. Ennek oka, hogy a létesítés költségei nominálisan magasak az elterjedten igénybevett szűrési kapacitás mellett. Az általa nyújtott előnyök azonban a technológia elterjedésével járó fajlagos költségek csökkenése és néhány területen a kizárólagossága miatt folyamatosan nőnek.[2]

A membránszűrők élettartamának ismerete, tönkremenetelének előre jelezhetősége rendkívüli jelentőségű a szennyvíztisztításban, hiszen ezen membránokkal a fizikai szennyeződések kiszűrése mellett egészségre ártalmas baktériumokat, vírusokat, nemkívánatos ionokat is eliminálni kell. Fontos tehát, hogy az élettartam elemzéseknél új, a prevenciót elősegítő számítási és elemzési módszerek terjedjenek el a mindennapos fejlesztési és üzemeltetési gyakorlatban. Történik mindez a gazdaságilag hatékonyabb folyamatüzemeltetés, és a minél nagyobb biztonság elérése érdekében az emberi egészség megőrzése és a minél kisebb környezeti terhelés mellett.[10]

Alapproblémaként megjelölhető az a hiányosság és ellentmondás, amely a gyártóknál és felhasználóknál rendszeres pontatlanságot okoz. Ez az élettartam számításának és megadásának a kérdése, ugyanis azonos tulajdonságú termékek sok tényező által befolyásolt, eltérő igénybevételi környezetbe és alkalmazási sajátosságok közé kerülnek. Az időtartamokra való utalás és a várhatóan bekövetkező események időpontjai tehát relatívak, mivel az előbb felsorolt okok a pontosságot jelentősen rontják.

1.2. A kutatástól várt eredmények és azok szerepe a gyakorlatban

A dolgozat irodalmi áttekintést ad a tönkremenetel értelmezésére és ismertebb definíciói területén. Ezt követően a legnagyobb csoportokat képező fém és polimer alapanyagok tönkremeneteli jellegzetességei mellett az általánosan bevált élettartam-számszerűsítő módszerekről és statisztikai elemzésekről ad keresztmetszetet a teljesség igénye nélkül.

Irodalmi kutatás tárgyát képezi a szennyvíztisztítás és ezen belül a szűrés feladata néhány alapproblémája, fókuszálva az üreges csőmembránokkal megvalósított tisztítás műveletére. Eközben bemutatásra kerül a csőmembránnal való szűrés menete, legfontosabb paraméterei. A kutatási rész elsőként az elemzéshez szükséges új megközelítésű fogalmak, mint:

- élettartam klórterhelés,
- egyenértékű működési idő,
- egyenértékű élettartam
- igénybevételi arculat,
- élettartam profil

bevezetésével, majd meghatározásukra számszerűsítő eljárások kidolgozásával foglalkozik.

Más területről adaptált új módszerként kerül bemutatásra a kritikus élettartam tényezők kijelölésének módja, amit a szakember csoport együttes csoportmunka keretében el is végzett.

Az első részekben megalkotott fogalmak és jellemzők számításához a teljes élettartamot nyomon követő és főbb paramétereiben dokumentáló adatbázis alapjai kerülnek lefektetésre. Ebben adatok és változók, faktorok és szöveges megjegyzések rögzítésére van lehetőség a számítási funkciók mellett. A cél a szűrőelemekre az egyenértékű élettartam meghatározása.

A megalkotott számítási módszerekkel meghatározott élettartamokra a körülményekkel való összefüggést, tönkremeneteli statisztikákat elemzünk az utolsó részben, valamint kijelöljük a továbbfejlesztés irányait, amely a gyakorlati hatékony alkalmazást szolgálhatják.[2]

A szennyvíztisztításban alkalmazott membránszűrők esetére – de más műszaki területeken is megfigyelhetően – készült módszertan és élettartam adatbázis egy fejlődési vonalban helyezhető el, így e folyamat egy fontos lépcsőjének tekinthető. Az „öszönösen” folyó folyamat lényege, hogy az egyedekről szerzett élettartam, károsodási és tönkremeneteli információk minél pontosabban mutassák az egyedek és az őket befogadó szerkezetek csoportjainak életkilátásait, alapul szolgálhassanak az állapot-fenntartási beavatkozásokra, valamint segítsék a termékfejlesztési tevékenységet.

Az általunk vizsgált iparági területre jellemző műszerezettségi és dokumentációs adottságok (pl. informatikai háttér) mellett a membránszűrés területén sajátos tendencia figyelhető meg. A modulokba, szerelt csőmembrán szűrőkre vezetett adatbázisok fejlődése lehetővé és szükségessé teszi az adatok integrált szemléletű feldolgozását.

Egy-két évtizede még *papíralapú* „adatbázist” vezettek az egyedek élettartamáról az üzemeltetők és karbantartók. Ezek a helyi igényességnek dokumentációs precizitásnak megfelelően készültek, és a karbantartási beavatkozásokat szolgálták. Emellett a módszer mellett a gyártó a legkritikább esetben kapott információt az elhasználódás miatt kieső egyedekről. Vagy a kevés, idő előtt meghibásodó – ezért reklamációval járó – egyedekről volt némi információjuk, vagy a gyári gyorsított tesztekéről. Jelenleg is ez a megoldás az általános, bár jellemzően kiegészült a karbantartás fejlődésével egy informatikai úton történő adatgyűjtéssel, ami nagymértékben segíti a feldolgozhatóságot.

Logisztikai alapúnak nevezhető az a szint, ahol a gyártó egy adott telepnek a tönkremeneteli sajátosságait a kiszállítási időpontok és felhasználási helyek összerendeléséből indirekt módon következtet az egyes szűrőblokkokban, kazettákban zajló tönkremenetelre, statisztikákra, problémákra. Csak esetlegesen jut adatokhoz a felhasználási körülményekre, beszerelési, üzemeltetői és karbantartói szokásokra és hibákra vonatkozóan. Viszont már számítógépen vezetett és rendszerezett adatokról van szó.

A *működési idő alapú* adatbázisban nem a logisztikai adatok ismertek, hanem több korrekció alapján a naptárilag értendő tényleges működési idő kerül vezetésre. Ehhez szükséges tudni, vagy legalább becsülni a ki- és beszerelési késedelmeket, valamint az igénybevétellel nem járó üzemi leállásokat.

Az *egyenértékű működési idő alapú* adatbázis a jelen kutatás eredményeként jött létre az említett szakmaterületen. Az adatbázismodell mellett a tényleges használati mennyiség megállapítására egy az üzemi viszonyokat is figyelembe vevő, transzformált idő van az egyedekhez rendelve, mely az adatok összehasonlíthatóságát hivatott biztosítani. Az adatbázis egyszerre azonosítja az egyedeket, mutatja az aktuális üzemi jellemzőket (időszakaszonkénti átlagolással) és az ezekből számított faktorokkal korrigálja a működéssel eltelt időt. A

faktorokkal kalkulált adatok pontosságán, részben az átlagolási intervallumokon múlik. Mindezek mellett az egyedek eseménytörténetéhez gyűlő szöveges információk is vezethetők.

Az *elhasználódás alapú* adatbázis az előzőhöz képest a technológiai körülmények okozta tönkremeneteli arányokat becsli valós idejű adatok alapján, amivel az átlagolás „durvasága” finomodik. Az „élettartam profil” sajátosságának megfelelően mindez együtt ad tájékoztatást az egyed jelen idejű állapotáról, valamint a jövőben várható tönkremeneteli eseményekről és szükséges beavatkozásokról. A kettőből tehát egyszerre informálódhat a helyi üzemeltető és a gyártó az üzemeltetési/karbantartási tennivalók, valamint a termékfejlesztési feladatok kialakításához. Természetesen ez a fázis nagyságrenddel magasabb szintű informatikai támogatást (pl. PLC alapú adatrögzítés) igényel a jövőben.

1.3. A dolgozatban megjelenő jelölések, nyelvezet

A dolgozatban törekedtünk a szakma- és tudományterületen elfogadott és gyakran alkalmazott jelöléseket használni. Viszonylag kevés helyen, de megjelenik a kettős jelentés. Az erre bevezetett, valamint az egyértelmű jelöléseket foglalja össze az alábbi táblázat.

1. táblázat A dolgozat fejezeteiben alkalmazott jelölések

általános alkalmazású jelölések		egyedi előfordulású jelölések		
jel	jelentés	fejezetszám	jel	jelentés
t	idő	2.2.1	M	molekulatömeg
t_e	egyenértékű működési idő	2.2.1	z	ionizálható helyek száma a molekulában
τ	élettartam	3.2.1	τ_{ny}	folyadékban ébredő nyírófeszültség
τ_e	egyenértékű élettartam		ε	a folyadék rétegek közti elmozdulás viszkoelasztikus anyag fajlagos deformációja
T	hőmérséklet	3.2.3	q	kopásintenzitás
π	3,14...		Q	kopásmennyiség
p	nyomás		b	faktor a terhelés mértékére
^	a jelek (betűk) felett a becsült értékek jelölésére		k	faktor a környezeti hatás erősségére
B	állomány, a működő egyedek gyakorisága	4.1	σ	mechanikai (normál) feszültség
R	működési (túlélési) valószínűség		n	igénybevételi ciklusszám
G	meghibásodási (kiesési) valószínűség	4.1.2	Δλ	nyúlásamplitúdó-arány
λ	kiesési ráta	4.1.3-4.2.5	T_K	várható élettartam, karakterisztikus élettartam
r	korrelációs tényező		b	alakparaméter (Weibull elo.)
R²	determinációs együttható		γ	helyzetparaméter (Weibull elo.)

általános alkalmazású jelölések		egyedi előfordulású jelölések		
ν	szabadságfok		x	Ált. valószínűségi változó
φ	fluxus		f	sűrűségfüggvény
q	anyagáram		F	eloszlásfüggvény
V	térfogat		σ	szórás
η	folyadék vagy viszkoelasztikus anyag viszkozitási tényezője		μ μ_0	a sokaság várható értéke
A	felület - szűrőfelület	4.2.4	ξ	az eredeti valószínűségi változó (lognormális elo.)
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;"> <p style="color: red; margin: 0;">A felsoroltakhoz képesti eseti eltéréseket a felmerülés helyén indexeljük, valamint külön ismertetjük!!</p> </div>			x	a transzformált valószínűségi változó $x=\ln\xi$ (lognormális elo.)
			m	a transzformált változó várható értéke
		5	$\Delta\pi$	ozmózisnyomás (különbség)
		6 - 8	LCI	klórterhelés, élettartam klórterhelés
			ϕ	szűrőterhelési faktor
			cc	koncentráció
			T^*	hőmérsékleti faktor
			$T-CI$	Hőmérséklet-klórterhelés kombinált faktor, (képletben csak TCI)
			h	kicsapódási hajlamot számszerűsítő faktor

A dolgozat meghatározóan többes szám első személyben íródik, ahogy az a tudományos irodalom autentikus nyelvezetében megszokott. A többes szám első személyű kijelentések mögött a saját megjegyzéseim, elemzéseim, kidolgozott módszereim értendők. A külső irodalmak eredményeit a hivatkozások, míg a témát befogadó cég szakembereinek jelenlétét a tény közzlése teszi egyértelművé.

2. Membránszűrők alkalmazása és jellemző igénybevételei szennyvíztisztításnál

2.1. A membránszűrés jelentősége és előnyei

A szennyvíztisztítás egyik modern formája, hogy a mechanikailag és biológiailag előtisztított, kisebb molekulákra bontott szennyezőanyagokat tartalmazó vizet utolsó tisztítási fázisként membránszűrők segítségével ultraszűrésnek vetik alá.

A *membránszűrési folyamatok* nagyon új, de ígéretes technológia a magas molekulású vegyületeket (pigmenteket, fehérjéket, olajokat, zsírokat, emulziókat, vagy mikroorganizmusokat stb.) tartalmazó hulladékok előkezelésére. Mindezek lehetővé teszik, hogy a tisztított víz

- visszaáramoljon a természetes vizekbe,
- betápláljon az ivóvízhálózatba, vagy
- speciális tisztasági igényeket támaztó ipari felhasználású vizet szolgáltatson.

A vizsgált technológia lényegében egy eleveniszapos eljárásba integrált membránszűrés, amelynek eredményeként közel ivóvíz minőségi jellemzőkkel bíró vizet kapunk. Segítségével az utóülepítési technológiai fázis problémái és költségei takaríthatók meg. További előnye, hogy energetikailag is hatékonyabb a bemenő membráncsővekben, a létrehozott vákuum hatására a szétválasztást és a folyadéktranszportot fenntartani, mint a hagyományos szűrésénél. (Vagy akár a más membránkonstrukciók esetén – a nyomás alatti keresztirányú keringetést a szeparáció elvégzésére.) Miután a membrán kiváltja az utóülepítőt, ezért lényegesen nagyobb biomassa koncentráció lehetséges (kb. 10-20 g/l), ami a létesítmény (elsősorban a bioreaktor) méreteit kedvezőbbé teszi. Nagyobb időmennyiséget töltenek az akkor még nagyobb molekulású szennyeződések a reaktorban, így a biológiai lebontás lehetősége egészen a szűrés bekövetkezéséig fennáll.[31]

A membránszűrés alkalmazásánál jelentős előnyökkel számolhatunk a hagyományos technológiákkal szemben. [35]

- A működési elvből adódóan magasan a legmegbízhatóbban szűri ki a káros mikroorganizmusokat és nagymolekulás anyagokat. A fordított ozmózis elvű szűrés alkalmazva a nemkívánatos ionok, nehézfémek és radioaktív anyagok is kiszűrhetők.
- A fenti előny okozataként említhető, hogy a kezdeti nagy beruházási, majd mérsékeltebb működtetési költség-igény az esetleges szennyezések kockázati költségénél megtérül. Különösen olyan térségben, ahol a tisztított víznél hatóságilag fokozott minőséget várnak el, amellet, hogy a bemeneti oldalon különösen nagy és széles spektrumú a víz terheltsége. (Pl. ipari létesítmények vizei.)
- Régi, elavult technológiát alkalmazó létesítmények viszonylag kis része könnyen átalakítható az eleveniszapos megoldással integrált membránszűrésre.
- Bizonyos földrajzi adottságokkal rendelkező területeken (sivatagi viszonyok közt, kis terület rendelkezésre állásakor) szinte egyedüli megoldás lehet.
- Ipari felhasználásra, speciális minőségi igények esetén egyedüli, ugyanakkor egyszerű, kompakt megoldást jelent.

- Az ultra-, nanoszűrés és a fordított ozmózzissal történő membránszűrésnek és az elérhető szeparációs méretekkel, ekkora kapacitás mellett technikai alternatívája gyakorlatilag nincs.

2.2. A szennyvíztisztítás elvi folyamata membránszűrés esetén

A membránszűréssel létrehozott víztisztítás első fázisa gyakorlatilag nem különbözik a hagyományos szemcsésszűrő technológiáktól. Itt a csatornahálózaton beömlő vízmennyiség mechanikai tisztítása a kommunális szennyvízből, valamint a csapadékvizekkel behordott nem folyadék fázisok kiszűrése, egyszerű ülepítése és eliminálása történik meg.

Ezt követi a biológiai lebontás fázisa aktív élőiszap kultúrával.

Kellő idő után a lebontott, ekkorra már kisebb molekulákat tartalmazó nyersvíz további szűrés, ülepítési műveletek mellett oxigénnel feldúsulva halad tovább, ahol a lebontás tovább folytatódik. Aktívszénrel, ózonnal, ritkán klórral történhet a víz oxidatív kezelése a folyamat ezen fázisában, a szennyező molekulák és a legkisebb mikroorganizmusok (baktériumok és vírusok) hatástalanítása érdekében.

A gravitációs és más elvű kiülepítést követően a minimális lebegőanyagot tartalmazó nyersvíz ekkor kerül a membránszűrőkkel működő reaktorba, ahol egyetlen menetben olyan tisztaságú víz keletkezik permeátumként, amely akár az ivóvíz tisztaságot is eléri. [35]

2.2.1. Az aktívszén és a polimerek a szennyvízkezelésben

Az *adszorpció* lehetősége – főleg a víztaszító anyagokra – aktív szén (GAC, PAC) alkalmazásával megvalósítható. A biológiai aktívszén az adszorbeáló hatásuk alapján alkalmasak a víztisztítási rendszerekben, hiszen a karbonrészecskék felületén a szerves bomlásból származó, többek közt nemkívánatos íz- és szagmolekulákat képesek megkötni. Az egyszerű granulált aktívszén (GAC – granulated activated carbon) szűrők a hagyományos szemcsésszűrő eljárásoknál részben adszorbensek, részben biológiai populáció fejlődhet ki rajtuk (mint fixágyas biológiai reaktorok BAC – biological activated carbon), rendszerint az ozonizálást követően. Egy másik aktívszenes megoldásnál por alakú, előnedvesített aktívszent alkalmaznak (PAC – powdered activated carbon) hasonló célból, amelyet kiülepítéskor egyéb lebegőanyagok iszapba juttatásakor kiürítenek a rendszerből. [53]

Emellett egy másik, széles körben elterjedt módszer is létezik a molekuláris szennyeződések eltávolítására. Szintetikus anyagcsere-átviteli gyantákat (*exchange resins*) is alkalmaznak adszorbensként, főleg azokban az esetekben, amikor speciális hidrofil anyagokat kell eltávolítani. Az PAC-et és a gyantákat egyaránt lehet regenerálni pl. *gőzelúcióval*¹. [47]

Polimerekben lineáris ismétlődésekkel egydimenziós struktúrából gombolyodással, vagy láncok elágazásával, illetve a molekulák kapcsolódásával alkotnak háromdimenziós hálózatokat. Azokat a polimereket, amelyek ionizálható csoportokkal rendelkeznek a lánc mentén, polielektrolitoknak nevezzük.

Amikor egy polielektrolit vízben diszpergálódik, aszimmetrikus ionokra válik szét. A nagy iont polionnak nevezzük. Ennek molekulatömege, M_1 , nagyságrendileg megegyezik a makromolekula molekulatömegével; az ionizálható helyek száma (z_1) nagyobb, mint az egységé. A kisebb ion – amelyet ellenionnak nevezünk, – molekulásúlya $M_2 \ll M_1$, és általában egyetlen ionizálható helye van ($z_2=1$). [47]

¹ a szennyező és a koagulatúmot létrehozó anyag forró gőzzel történő szétválasztása leöblítéssel, kimosással

Például, a szulfonált polisztirolból nyert sók alkalmasak az ionizáló technológia lefolytatására. A polielektrolitok lineárisok, vagy kis, megegyező alegységek elágazó láncából állnak, néha két vagy három különbözőféle alegységből. Ezek a polimerek vízoldhatóak, vezetnek elektromosságot, és hatnak rájuk a töltéseik közötti elektrosztatikus erők. Néhány természetes polielektrolit rendkívül fontos a biológiai struktúrák működtetésében. Ennek a típusnak a hosszú láncmolekulái 2-3-tól 10^6 alegységet tartalmaznak. A szétváló polimereket, amelyek negatív töltésű polimer ionokká válnak, anionos polimereknek nevezzük, a pozitívokat kationosnak. Azokat a polimereket, amelyek szétválva nagy pozitív ionokat és nagy negatív ionokat is adnak, felületaktív (ampholitikus) polimereknek nevezzük. Kationos, anionos, nemionos és felületaktív polimereket megfelelő monomer kiválasztásával készíthetünk. [47]

2.2.2. A polimerek szerepe a koagulálásban

Szükséges definiálnunk a koagulálás, flotáció – flokkulálás (pelyhes csapadékleválasztás), koaguláns és a koaguláló segédanyag fogalmát, mert a különböző kutatók eltérően alkalmazták ezeket. A hivatkozott tanulmányban a koagulálás fogalmát a kolloidok stabilitáscsökkentésének jelölésére alkalmazzák, de a fenti meghatározáson túl magába foglalja a flokkulálást és az ülepitést is. [47], [35]

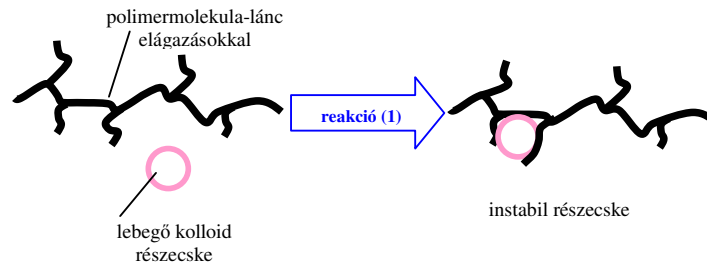
- A flotáció – vagy flokkulálás – a destabilizált kolloidok (mikropelyhek) növelését jelenti adott sebesség-gradienssel, nagy ülepithető pelyhekké.
- A koaguláns egy kémiai anyag, amelyet a kolloidok stabilitáscsökkentésére és ülepitésére használnak.
- A koaguláló segédanyag olyan kémiai anyag, amelyet a pelyhek ülepitetőségi tulajdonságának javítása (térfogati sűrűségének és a pelyhek méretének és stabilitásának beállítása) érdekében adnak hozzá, ennek mechanizmusát jelen fejezetben tárgyaljuk.
- Néhány tanulmány a szervesen sókat nevezi koagulánsoknak, a polimer anyagokat pedig flokkulánsoknak, ennek következtében a kolloidok kicsapását *koagulálásnak* nevezi, ha szervesen sókat alkalmaznak, és *flokkulálásnak*, ha polimereket. [47], [35]

A koaguláló segédanyagok legtöbbje polielektrolit. Ezeket az anyagokat használva nagyobb sűrűségű pelyheket kapunk. Ha a polielektrolitokat koaguláló segédanyagokként alkalmazzuk, csökkentik a kolloidális rendszerek stabilitását, és elősegítik koagulálásukat. Számos alkalmazás során kimutatták hatékonyságukat a víz- és szennyvízkezelésben. [47]

A koagulálás során vegyszereket adnak a szennyvízhez (vagy vízhez), hogy csökkentsék a kolloidikus részecskéket egymástól távol tartó erőket. Egy polimer-szol rendszer flokkulálása csak akkor vezet eredményre, ha egy só megfelelő koncentrációban van jelen az oldatban. Mindamelllett, a flokkulálás általában sokkal kisebb elektrolit koncentrációknál jelentkezik, mint amilyen szükséges a polimerek távollétében. [35]

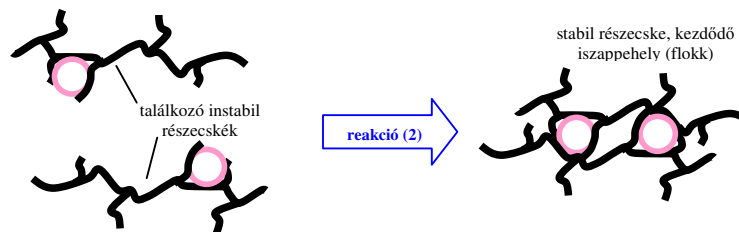
A szennyvízkezelési folyamatok legtöbbje esetében a stabilitáscsökkentést polimerek hajtják végre. Ezeket a polimereket adagolni lehet a folyamathoz, vagy a folyamaton belül is elő lehet állítani. A flokkulálásba bevont folyamatok kétségtelenül nagyon összetettek, de egy leegyszerűsített mechanizmus ábrájának segítségével nyomon követhetjük a polimerek viselkedését a kolloidikus oldatok (mint a szenny- és más tisztítandó vizek) flokkulálási folyamatában, az alábbi mechanizmusok szerint. [47], [35]

- Amikor egy polimer kapcsolatba kerül egy kolloidikus részecskével, ezen csoportok némelyike adszorbeál a részecske felszínén, és hagyja a molekula megmaradó részét kiterülni az oldatban, de ez destabilizált részecskét eredményez. (reakció (1)).



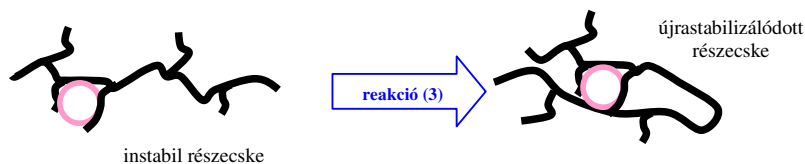
1. ábra Kezdeti adszorpció optimális polimerdózisnál.
A polimer és kolloid részecske reakciójából instabil részecske képződik.

- Ha egy második, néhány szabad adszorpciós hellyel rendelkező részecske kapcsolatba kerül ezekkel a kiterült instabil szegmensekkel, hozzájuk tud kapcsolódni, stabil képletet létrehozva (reakció (2)). Így egy részecske-polimer-részecske komplex alakul ki, amelyben a polimer hídként szolgál, optimális „flokot” létrehozva.



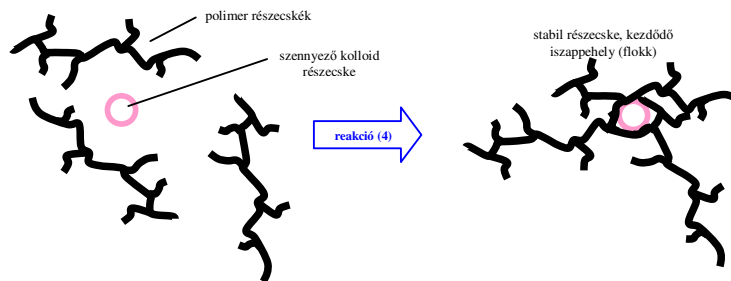
2. ábra Pehelyképződés stabilitáscsökkentett részecskék ún. iszaphehely létrejöttével, optimális polimerdózisnál. A polielektrolitok szegmenseinek kereszt-kapcsolódásával hidakat alkotnak a feloldott kolloid részecskék között

- Ha nem áll rendelkezésre második részecske (elsődlegesen jelenlevő vagy másodlagosan kialakult flokk részecske jelenlétével), idővel a kiterült szegmensek végül adszorbeálódnak az eredeti részecske más helyein, így az többé nem képes hídként funkcionálni (reakció (3)). Amennyiben a szennyező részecske leköti a kezelő polimer túl sok funkciós csoportját, esetleg nehezebben kezelhetővé válik a flokkulálás eredményeként létrehozott képlet, (üledék, hab, stb.) a struktúra kisebb stabilitása miatt.



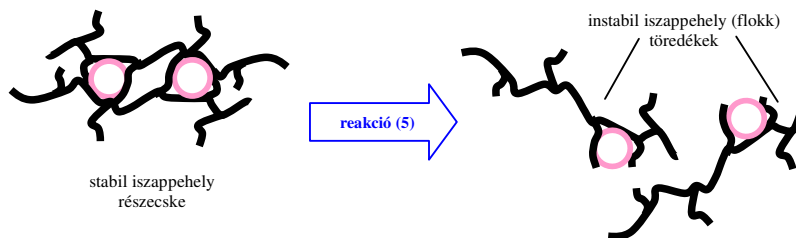
3. ábra Másodlagos adszorpció során újrastabilizált részecske.
Optimális polimerdózis mellett

- Túladagolt kezelő polimer esetén is a részecskéket körülveszik a polimer szegmensek, de a kiterülő részük szabályozatlan reakciókban vehetnek részt. (reakció (4))



4. ábra Pehelyképződés úgy, hogy a kezdeti adszorpció után stabil részecske jön létre, de túladagolt polimerdózis jelenlétében

- A korábban flokkulált részecskék szakadozása esetén ismét instabil részecske lesz az eredmény. (reakció (5)) A reakciókhoz szükséges feltételek megléte esetén a folyamat a 2-es vagy a 3-as reakcióknak megfelelően folytatódhat.



5. ábra Az iszappehely szétszakadásának folyamata iszappehely nyíródással és iszappehely töredékek létrejöttével

Sok mechanizmusát tervezték már egy polimer csoport és a részecskék funkció csoportjai közötti kölcsönhatásnak. Az ipari szennyvízkezelés jelentős részénél a kommunális, konyhai stb. berendezések hulladékát összegyűjtik a főfolyamat hulladékával, és együtt kezelik azokat. Ebből következően az ipari szennyvíz más kezeléseket is igénylő mikroorganizmusokat tartalmaz. A koagulálás alkalmazása során ezeket más kolloidokkal együtt távolítják el a szennyvízből.[47]

Élőiszapos kezelésnél viszont pont az jelenthet problémát, ha a kezelt szennyvíz nem tartalmaz elegendő „tápanyagot” a lebontó mikroorganizmusoknak. Ilyenkor a kommunális szennyvíz szabályozott beadagolása jótékony lehet a hatékony tisztítás elérése érdekében.

2.2.3. Membránok alkalmazása a szűréstechológiában

A mesterséges, *permeszelektív membránok* két fázis elválasztásakor aktív vagy passzív válaszfalként a vele érintkezésben lévő fázisok közötti anyagátvitelt korlátozzák. Ezek tehát félig átteresztő „falak”, amelyen egyes komponensek képesek áthatolni. Szűrés esetén a kisebb részecskeméretű összetevőt a nagyobb nyomás képes áthatolásra kényszeríteni, mialatt a nagyobb részecskeméretűt nem.

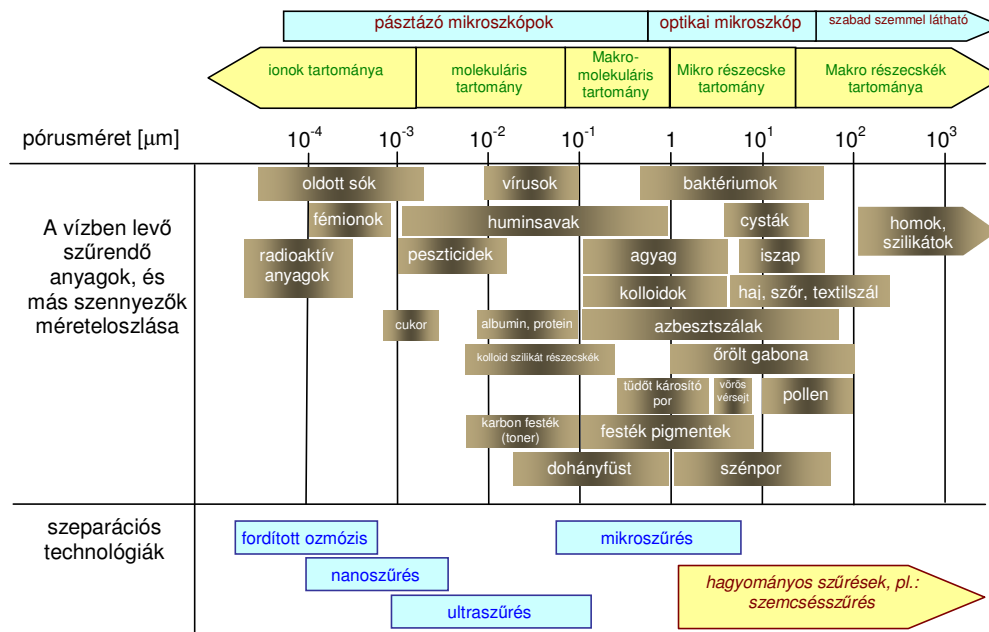
Kompozit vagy *összetett membránok*, melyek úgy készülnek, hogy polimer filmet visznek fel egy porózus (legtöbbször textiltechnológiával, elemi szálak kötegeiből gyártott) anyagra. Megjelenési formájuk szerint léteznek:

- lapmembránok,
- spirál modulok (lapmembránokból feltekercseléssel alakítva),
- cső-és ürepszál-membránok,
- mikro kapilláris membránok,
- speciális membrán és modellkonstrukciók (pl. méhsejtszerű kerámia membrán stb.). [47]

Anyagát tekintve a 0,05-0,3 μm pórusméretű, hidrofil membrán, magas szakítószilárdsággal, jelentős radiális nyomószilárdsággal (a csöves szerkezet vákuum alatti összeroppanását megakadályozandó) és oxidánsokkal szembeni rezisztenciával rendelkezik. A membrán ellenálló képességét és magas szakítószilárdságát a textília körkötött, körhurkolt, vagy fonatolt szerkezete, esetleg egy belső fémes váz biztosítja, melynek külső felületén helyezkedik el maga a polimer alapanyagú membrán.

A szennyvíztisztítás területén a *membrán-szűrés* a nehezen kézben tartható *utóülepítést hivatott kiváltani*, de *speciális esetekben a szennyvíziszap sűrítésére is felhasználható*.

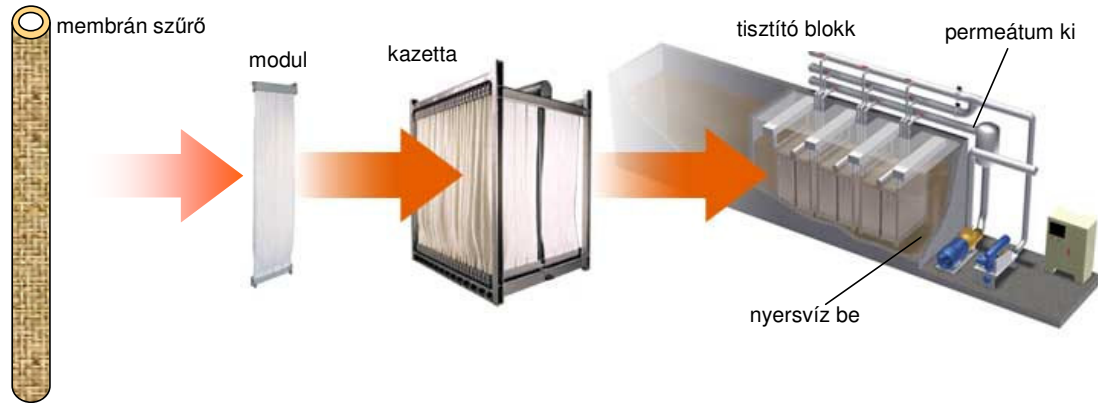
Membránszűréssel valósítják meg az alábbi szűrési feladatokat, amelyek között az átmenetek átfedésekkel, de lényegében a pórusméret alapján definiálhatóak.



6. ábra A szűrési technológiák felosztása és általában a szűrési feladatot adó részecsketípusok [53] és [56]

A későbbiekben elemzésre kerülő membránszűrő fizikai megjelenését tekintve néhány milliméteres cső, amelynek a fala akadályozza meg a víztől eltérő méretű molekulák közlekedését, és ez által biztosítja ezek kiszűrését. A csőmembrán külső falán kívül az előtisztított szennyvízes közeg (*nyersvíz*) nagyobb nyomással rendelkezik, mint a belsejében levő alacsony nyomású ultraszűrt közeg. Így a külső palást mentén történik a szűrés, és kívülről befele a közegáramlás. (8. ábra) A szűrőmodul több üreges csőmembránból áll, mely nagy

felületet alkotó térfogategységet képez. (7. ábra) A membrán modulokat kazettákká állítják össze, amelyek saját nyersvíz medencével és permeátum gyűjtővel, mint működési egységek vesznek részt a gépészeti rendszerben.



7. ábra A szűrőállomás elvi felépítése

A szűrés nyomásviszonyait az ún. *nettó nyomás* fejezi ki legpontosabban, amely a nyersvíz *tápnomását* (p_1) és az átszűrt permeátum (p_2) *átszűrődési nyomásának* különbségét, a membrán koncentrátum által kifejtett nyomást (p_c), valamint a koncentrációkülönbségek miatt kialakuló *ozmózisnyomás-különbséget* ($\Delta\pi$ – [Pa]) is figyelembe veszi. [53]

$$p_{netto} = p_1 - \frac{1}{2(p_1 - p_c)} - p_2 - \Delta\pi \text{ [Pa]} \quad \{28\}$$

A felületi szűrésnél általában a felfogott szennyeződést – a szűrletet – azonban rendszeresen el kell távolítani, hogy a szűrés hatékonyság megmaradjon. A használat során a vastagodó szűrletreteg ún. *szűrőleplenyt* hoz létre, amely már a kívántnál kisebb molekulákat is visszatartja, valamint nehezíti az anyagáramlást.

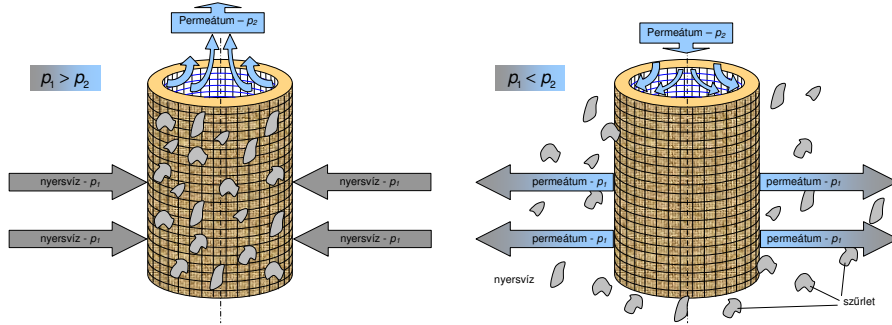
A csőmembránokkal való szűrésnél a klasszikus szűrőlepleny nem alakul ki. Általában a szűrés hatékonyságát csökkentő szennyeződésről beszélnek, amely lehet:

- kolloid jellegű lerakódás a membránon, azon belül is a pórusok belső falán. Kialakulásának oka a kolloid részek felületi potenciálja.
- biológiai eredetű eltömődés alakul ki, mivel baktériumok, algák és más a pórusmérethez mérhető mikroorganizmusok és azok telepei,
- felszíni vizek szervesetlen lebegő részecskéi, valamint
- a kemény vizek kalcium-karbonátos lerakódásai.

A felsorolt tényezők együttesen rontják a szűrés $p_1 - p_2$ különbségével korreláló szűrés hatékonyságát. Ettől a normál üzemben a szűrőmodulok és -kazetták kiszerezését és más karbantartási eljárást nélkülöző módon, menet közben kell megszabadulni.

- **Ciklusos visszamosás** azt jelenti, hogy a szűrés funkció alatti kívülről befelé irányuló áramlást egy rövid időre (a szűrés ciklusok időtartamának kb. 2-4%-át kitevően) megfordítják a nyomásviszonyok megváltoztatásával. (9. ábra) Ekkor a cső belsejében levő permeátum, a membrán és/vagy a szűrőszövet vázanyagának pórusain kifele áramolva, az eltömítő szennyeződést „kiöblíti” a szűrletlen vízbe. A szennyoldali

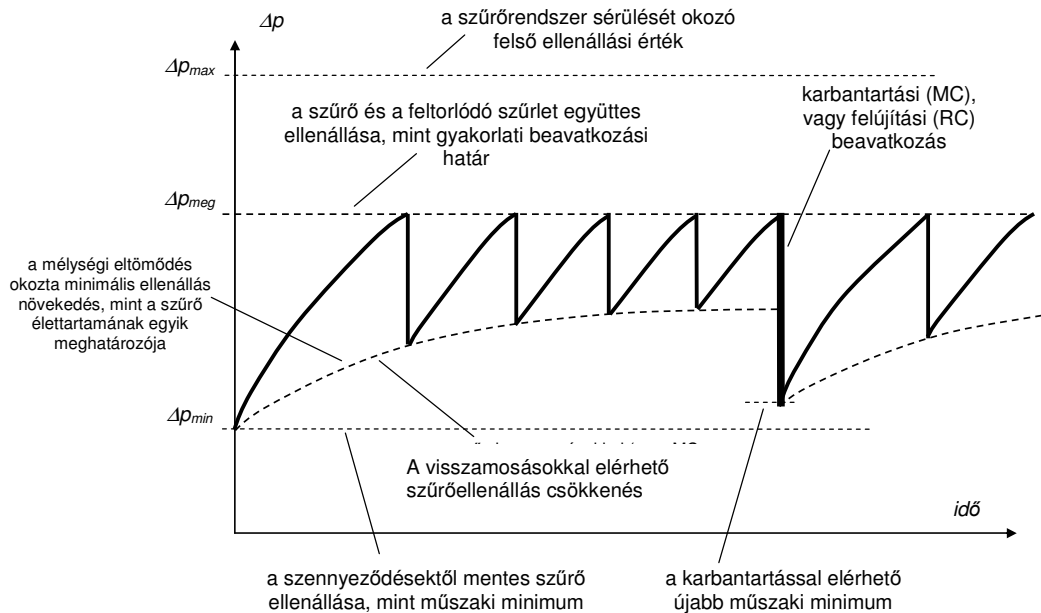
folyadékban a szűrletet a betöményedő iszappal aztán a szokásos technikával eltávolítják. A nyomásviszonyok visszaállításával a szűrés folytatódhat.



8. ábra Az anyagáramlás és a nyomásviszonyok szűrészkor

9. ábra Az anyagáramlás és a nyomásviszonyok visszamosáskor

A nyomásviszonyok változása tehát a szűrők külső felületén és a pórusok bemeneteinél megtapadó szennyeződés mennyiségétől függ. A szennyeződések megtapadását részben az áramláskor kialakuló nyomás, a szűrőanyag és a szennyeződés közti molekuláris (Van der Waals) erők, valamint a feltorlódozó szűrlet záró hatásai segítik elő. A szűrészkor és az ennek eltávolítását segítő visszamosáskor uralkodó elvi nyomásviszonyokat mutatja a 10. ábra a [29] irodalom alapján.



10. ábra A szűrő ellenállásának (p_1-p_2) változása, valamint a műszakilag fontos nyomásparaméterek a szűrés, visszamosás és a karbantartási ciklusok során

- **„Levegőztetés”** során a szűrési üzemmódra jellemző áramlást a visszamosás helyett megállítják (tápvíz és a permeátum nyomásának kiegyenlítésével), majd a szűrő kötegek közt alulról buborékoltatott levegőt vezetnek, ami a szűrők felületeinek „végigsimításán” és „rázásán” keresztül mechanikailag távolítja el a paláston levő szennyeződést. (A visszamosás frekvenciája általában kísérletileg alakul ki.) Az esetek többségében ezt a „mechanikai agitációt” az áramlás megállítása nélkül, folyamatos üzemben is alkalmazzák. Mechanikailag fárasztó-öregítő hatása a szűrő anyagára ekkor is van, azonban a fejlődő szűrőleplenytől való megszabadulás az élettartamra és a teljesítményre egyaránt jótékony hatású.

A két mechanizmus segítségével a felfogott anyagok túlnyomó része hatékonyan eltávolítható, csak bizonyos ásványok alkotta filmréteg alakulhat ki és növekedhet meg lassan a paláston, amit a dinamikus és statikus öregítési tényezőket jelentő karbantartási eljárásoknál még ismertetünk.

A folytonos üzemmenet megszakítását jelentő karbantartási lépéseknél végzik el a szűrőből visszamosással el nem távolítható szerves anyagok vegyszeres lebontását, valamint a véglegesen meghibásodott szűrőmodulok cseréjét.

3. A Jellegzetes tönkremeneteli formák fémes és nemfémes szerkezeteknél

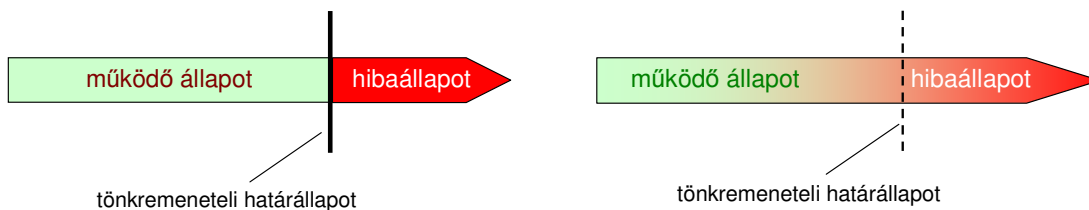
A fejezetben található irodalmi áttekintés szisztematikusan halad végig az élettartamot meghatározó tönkremeneteli formáktól az adatok feldolgozásakor kapható (pl. terhelés-élettartam) összefüggésen keresztül a matematikai statisztikai feldolgozásig. Ezt követően a membránszűrés területén érinti a legfontosabb szűréssel, szennyvízkezeléssel kapcsolatos ismereteket.

3.1. A tönkremenetel definíciója, tönkremeneteli határállapot

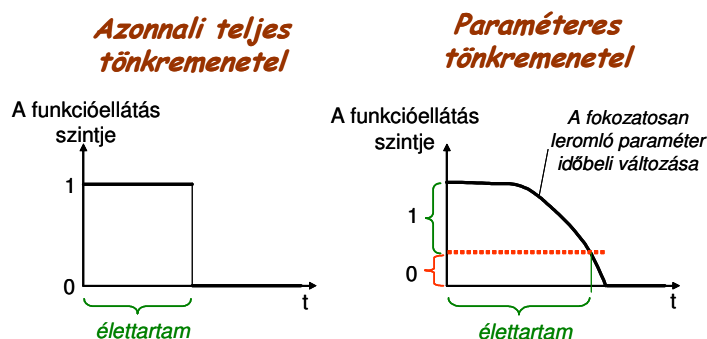
A tönkremenetel vagy meghibásodás tényét sokszor azonosítják az elvárt funkció(k) elvesztésének egyértelmű bekövetkezésével. Több funkció esetén persze a kieső funkciók némelyike már nem feltétlenül tekinthető annak, így minőségi elkülönítés (mint pl.: nélkülözhetetlen és nélkülözhető funkciók) is szükséges. Megkülönböztethető a *teljes meghibásodás*, amikor a rendeltetés szerinti használat minimális szinten sem teljesül, valamint a *részleges meghibásodás*, amikor valamilyen szinten megvalósul a működés, azonban valamely paraméterek a kritikus értéken kívül vannak. [41]

A tönkremenetel maga az a folyamat, amikor a működő állapotból a hibaállapotba jut el a berendezés. A hibaállapot bekövetkezését egy határnak vagy küszöbnek az átlépése, vagyis a tönkremeneteli határállapot bekövetkezése jelenti.

A tönkremeneteli határállapoton értjük azt az időben megadható eseményt, amelyet követően a berendezés az elvárt funkciót (vagy minimálisan teljesítendő funkciók halmazát) nem kielégítő módon teljesíti. Ez történhet *egységugrásszerű, hirtelen, teljes funkcióvesztést okozó* módon (11. ábra és 12. ábra baloldali ábrái), vagy időben elhúzódva, egy vagy több paraméter folyamatos leromlásával kísért módon [41]. (jobboldali ábrák).



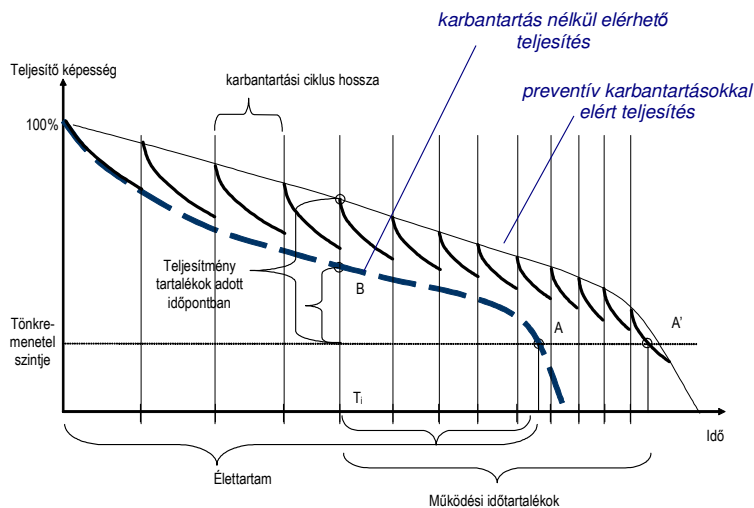
11. ábra A meghibásodási folyamat a funkcióellátás mértéke szerint illusztrálva



12. ábra A tönkremenetel lehetséges formái és a tönkremeneteli határállapot meghatározása időbeli lefutás alapján függvényen ábrázolva. [41]

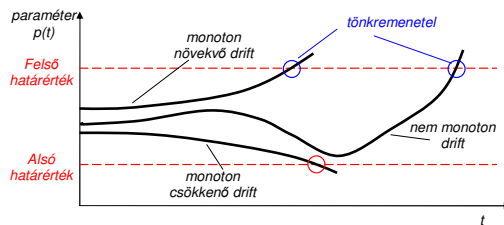
(Az „1” logikai érték a működőképes állapotot, míg a „0” a tönkremeneteli állapotot jelöli)

A meghibásodások bekövetkezésének másik lehetséges formája a *paraméteres tönkremenetel*, vagy az elektromos terminológiából átvett drift. Elsőként tekintjük a paraméteres tönkremenetelt, mint időben elhúzódó, a teljesítményszint, vagy a funkcióellátás szintjének leromlását okozó eseményt. Ekkor a legegyszerűbb, általános irodalmi megközelítés szerint a 12. ábra jobboldali ábráját említhetnénk. A határállapot megadása részben történhet műszaki megfontolások alapján előírásokkal, másrészt a karbantartói/üzemeltetői tapasztalatból empirikus úton. Amennyiben a javítható rendszereknél a karbantartások lehetősége is adott, a 13. ábra szerint követhetjük egy rendszer teljesítőképességét és élettartamát.



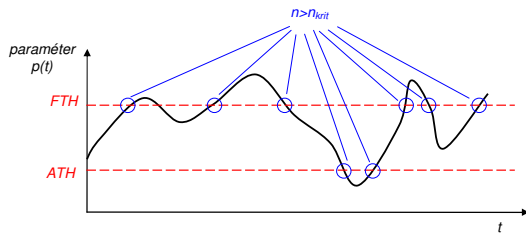
13. ábra Egy berendezés teljesítőképességének időbeli változása az élettartam előrehaladtával (jelleggörbe) [34]; [41] és [29] alapján

A degradációra visszavezethető tönkremeneteli mechanizmusok valóban valamilyen leromló paraméter kíséretében szoktak bekövetkezni. Különbséget tehetünk monoton és nem-monoton drift között. A *monoton driftet* olyan kimeneti változó paraméter jellemzi, amely folyamatosan ugyanabban az irányban változik. Amennyiben a kimenet értéke keresztezi az egyik korlátozó feltételt, másként határértéket, bekövetkezik a meghibásodás. A *nem monoton driftnél* a kimeneti értéknek mind pozitív, mind negatív irányba történő kitérése előfordulhat (14. ábra) A meghibásodást határértékek átlépésével is korrekt módon megadhatjuk. [47]

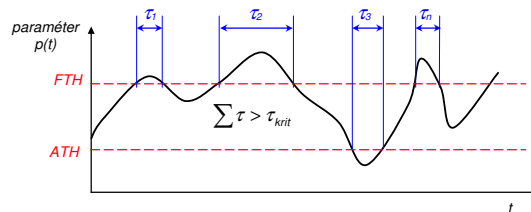


14. ábra A paraméterműváltozások formái (drift) és a belőle következő tönkremenetel [47]

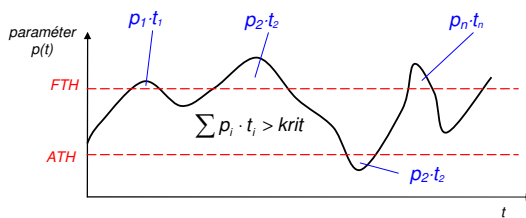
Nem monoton módon változó drift esetén elképzelhető, hogy a tönkremenetel később következik be, azonban előre becsülhetőnek akkor tekinthetjük a tönkremenetel idejét, ha aktív beavatkozásaink, de legalábbis a környezeti feltételek kézbe tartott változása okozza. Vagyis ha a károsodást befolyásoló környezeti paramétereket, növekvő kopásokat, illesztéseket, kontaktusokat, illetve az ezekből kiinduló káros szinergiákat karban tudjuk tartani, a monoton paraméterműváltozások irányváltása és ezáltal az élettartam meghosszabbítása lehetővé válik.



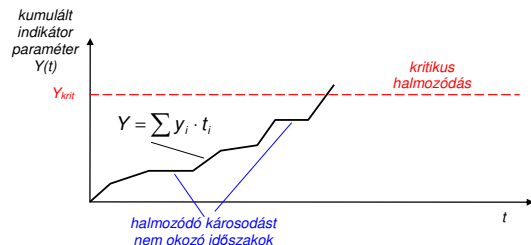
15. ábra A tönkremenetel oka a határparaméter átlépésének kritikus gyakorisága



16. ábra A tönkremenetel oka a határparaméteren kívül töltött kritikus összes idő



17. ábra A tönkremenetel oka a határparaméteren kívül töltött, az eltérés mértékével súlyozott összes kritikus idő



18. ábra A tönkremenetel oka a kumulált indikátor paraméter kritikust meghaladó mértékű túllépése [47]

A tönkremenetel egyértelmű megadásához alkalmas szabályrendszert kell teremteni. Ennek lehetőségei szerint négy csoportot különíthetünk el. ([47] alapján)

- Tönkremenetelnek tekinthetjük, amikor a drift során alakuló paraméter határátlépéseinek száma ér el egy megengedhető mértéket. Amennyiben a határérték egyedi átlépései önmagában még nem adnának okot a tönkremenetel (meghibásodás) tényének kijelentésére, azok sűrűsödése viszont már megalapozhatja a tönkremenetelről hozott döntésünket. (15. ábra)
- Vannak esetek, amikor a határérték-átlépések száma más körülmények miatt esetleges és időnkénti bekövetkezése még nem végzetes, viszont az ezen túli tartózkodás kumulált ideje megengedhetetlen. (16. ábra)
- Az előző diagnosztikai mód árnyaltabb változata, amikor a határértéktől való eltérés mértéke és időtartama is fontos a tönkremenetel megállapításához. Ekkor a paraméter leíró függvény határértéken túli területének kumulált mértéke alapján jelentjük ki a tönkremenetelt. (17. ábra)
- Amennyiben halmozódó károsodások okozzák a tönkremenetelt, egy indikátorként használt paraméterről rajzolt kumulált függvény segíthet hozzá a tönkremenetelek felismeréshez. (18. ábra)

A tönkremeneteli határállapot definiálását más szempontból is vizsgálni kell. Eddigi példáinkban azon az alapon jelentettük ki a tönkremenetelt, hogy az egyetlen paraméter, amit vezettünk, a határértéken kívül került. A valóságban – különösen a nagyobb komplexitású szerkezeteken (organikus szervezetekben is) – több paraméter egyidejű alakulása határozza meg a használhatóságot / tönkremenetelt. A használhatatlanság kialakulása ekkor is több kombinációban képzelhető el.

- A paraméterek közt nincs kiemelt fontosságú, így ha a megengedettnél nagyobb számú paraméter specifikáción kívül kerül, tönkremenetelt jelentünk ki. Ennek analógiája, ha funkcióellátási képességet értünk a paraméterek értékein. A kritikusnál nagyobb mennyiségű funkció kiesésekor tönkremenetelt jelentünk ki. *(Pl. háromszorosan túlbiztosított áramellátású berendezésnél, ha a pótbetáplálás lehetősége 1-re csökken, tönkremenetellel egyenértékű eseménynek kezelik.)*
- Ha a paraméterek (vagy funkciók) közt van kiemelt fontosságú is, akkor a nem kiemelt funkciók kritikus számot meghaladó kiesésekor, vagy ettől függetlenül a kritikus funkciók bármelyikének kiesésekor tönkremenetelt jelentünk ki. *(Pl. gépkocsin az ablakmosó szivattyújának elromlásakor, a hűtővíz munkapontjának megemelkedésekor, a turbónyomás csökkenésekor, vagy a kormány szervő teljesítménycsökkenésekor még nem, de az olajnyomás kritikus szint alá csökkenésekor a fedélzeti elektronika letiltja a motor működését.)*
- A működtetés külső körülményei miatt is működésképtelenné válhat egy berendezés, a belső paraméterek elégséges szintjének ellenére is. *(Pl. a nem megfelelő áramellátás esetén egy elektronikus biztonsági rendszer – autóriasztó, védett épület beléptető rendszere, gépjárművek fedélzeti elektronikája – a tönkremenetel legkülönbözőbb és akár megtevesztő jeleit is képes produkálni.)*

3.2. A kopás

A kopás a súrlódásos kapcsolatban álló felületek relatív elmozdulásából származó anyagvesztés, amely egy bizonyos mértéket elérve a szerkezetet működésképtelenné teheti, így a szerkezetek élettartamát meghatározó tényező. Az anyagvesztés ott kezdődik, és ott okozza a legnagyobb értékromlást, amely felületet a legnagyobb gondossággal hozták létre az anyagválasztás során, az anyagtulajdonságok helyi kialakítása során (pl. felületnemesítés, fermentálás alkalmával), valamint a pontos geometria és a felületi struktúra kialakításakor (forgácsolás, felületbevonás, ...). Akár kismértékű anyaglehordás is a szerkezet élettartamának végét jelentheti. A tönkremeneteleket okozó súrlódás formái az alábbiak lehetnek: [31]

3.2.1. Kopás szárazsúrlódással

A súrlódás két egymással közvetlenül érintkező felület relatív elmozdulását megakadályozó vagy nehezítő hatás. Amennyiben ún. „száraz” felületek közt jön létre, *szárazsúrlódásnak* nevezik, és a felületek makro-és mikrogeometriai egyenetlenségei által befolyásolt, molekuláris közelségű tartományban lejátszódó jelenségekkel tárgyalható. [1]

Amennyiben relatív elmozdulás még nem jön létre, az érdességi csúcsok találkozásának helyein csak a rendkívül kicsi felületek viselik a terhelést, így nagy helyi nyomások alakulnak ki. Álló helyzetben lehetőség és idő van arra, hogy az érintkező felületek molekula és/vagy kristályszerkezetei a kristályokra jellemző diffúzió vagy a molekulák közt kialakuló *Van der Waals erők* miatt adhézió, vagy akár helyi összehegedés alakuljon ki. Az elmozdulás ilyenkor részben ezen erők feltépése, másrészt a mikrogeometriai formációk önzáró hatásának leküzdése árán valósulhat meg. [1]; [31]

Amennyiben relatív elmozdulás alakul ki, az előzőekben leírt jelenségek nem lesznek hangsúlyosak (esetleg extrém nagy felületi nyomás kialakulása esetén), így az elmozdulást már csak az érdességi csúcsok deformálódása nehezíti. Ennek három lehetséges formája ismeretes: elnyíródás, rugalmas deformáció és az érdességi csúcsok képlékeny deformációja. [1], [11]

Szárazsúrlódás esetén a felület leépülése a legtöbb esetben a 14. ábra szerinti monoton teljesítményszint-romlást eredményezi, miután a teherhordó felületről anyagvesztés történik.

Amennyiben a szárazsúrlódás túl nagy súrlódó erővel, anyagvesztéssel (kopás), megengedhetetlen hőfejlődéssel, hanghatással járna, kiváltására folyadéksúrlódás kialakítása jelenthet megoldást. A két felület közti részt folyadékkal tölthetjük fel, amely kellő nyomás kialakulása esetén eltávolítja azokat egymástól. Így a relatív elmozdulásnak csak a folyadékban kialakuló nyírófeszültségek állnak ellen, ami viszont egy nagyságrenddel kisebb súrlódási tényezőket eredményezhet. A folyadékban így lamináris áramlás jöhet létre; az ellenállás leírására a Newton által leírt törvény válik alkalmassá. [42]

$$\tau_{ny} = \eta \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \{1\}$$

A folyadékként a szilárd felületek közé juttatott kenőanyagokban a szükséges nyomást vagy a kellő nagy elmozdulási sebesség, vagy a kellően nagy dinamikai viszkozitási tényező képes fenntartani. Amennyiben vegyes súrlódás (száraz és folyadéksúrlódás kombinációja) lépne fel, lehetőség van az alap- és ellentest kémiai „illesztésére” és a határkenés kialakítására. Ez lényegében a szilárd test felületi határretegének kemoszorpciós módosítása, amely a helyi súrlódási viszonyokat kedvezően befolyásolni képes. [1]; [42]

3.2.1.1. Abráziós kopás

Az abráziós vagy lehordó kopás során a keményebb anyag érdességi csúcsa az ellentest anyagába behatol, azt többnyire képlékeny alakváltozásra kényszeríti és lényegében forgácsleválasztást végez. A lehordott anyag további kölcsönhatásban marad a felületekkel, darabolódhat, ismét kötődhet valamelyik felülethez, persze további sérüléseket okozva a felületen. Kísérletekkel igazolták, hogy a rugalmassági modulus valamint a felületi keménység egyértelmű pozitív korrelációt mutat a kopásállósággal.

A felület élettartama a felületi keménység növelésével (betétedzés, fermentálás, kerámia bevonat, keménykróm bevonat), nagyrugalmasságú réteg kialakításával (pl.: teflon bevonat) vagy a kenési rendszer módosításával (hatékonyabb elkülönítés, jobb kenőanyag-tisztítás, nagyteljesítményű kenőanyag-adalékok, ...) növelhető.

3.2.1.2. Sodrókopás

Különösen nagy rugalmasságú polimerek (gumiszerű anyagok) felületének rugalmassága szinte teljesen megmarad az abrazív igénybevétel során. A lehordás kezdetén a felületi és az alatta levő réteg közt rendkívül nagy nyúlás következik be, így az anyagleválást nem a felületi érdesség egymásba hatolása, hanem a letapadt réteg leszakadása okozza. Az elmozdulás során a leszakadt réteg felhengeredése a leválást tovább segíti, így a leválás jellegzetesen sodrott anyaghordalékként jön létre.

A szakterület a jelenségből eredően *sodrókopásnak* is nevezi. Ez utóbbi jelenséggel igazolható, hogy nagy rugalmasságú polimerek (gumiszerű anyagok) kopás által meghatározott élettartama nem elsősorban a keménységgel, hanem a szakítási munkával áll szorosabb korrelációban.

3.2.1.3. Eróziós kopás

Az eróziós kopási folyamatot kisméretű, szilárd halmazállapotú részecskék hozzák létre, amelyek gáznemű vagy folyadék vivőközegben áramlanak. A lebegő szilárd részecskék az áramlást biztosító vezetékek falain, szivattyúk lapátjain, porleválasztókon vagy bármilyen iránytörően, valamint hidraulikus és pneumatikus rendszerekben, szállítószalagok kilépési pontjain fejtenek ki koptató hatást. A nagy sebességgel haladó részecske a felületbe ütközve

szintén sérülést szenved (rugalmasan ütközik, törik, képlékenyen alakul), viszont az ütközés helyén a forgácsleválasztáshoz hasonlító hatást kelt.

3.2.1.4. Fáradásos kopás

Fáradásos kopás alakul ki, ha a felületen az érdességi csúcsokban, vagy azok tövében levő anyagrétegekben a súrlódás miatti ciklikus igénybevételi folyamatok rugalmas és képlékeny alakváltozásokat gerjesztenek. A váltakozó hatásra az elmozdulással párhuzamos irányban felkeményedések, a feltorlódiszlokációk és anyaghibák miatt apró repedések indulnak el. A repedések mentén részecskeleválások indulnak, így a nagy gondossággal kialakított felület lehámlása következik be. Az ilyen módon létrejövő tönkremenetelt a felszín alatti rétegben ébredő nyírófeszültség kritikus határt meghaladó növekedése okozza. A súrlódó erők okozta csúsztatófeszültség közvetlenül, míg a felületre normális irányból ható terhelés keltette normálfeszültség közvetve okozza a τ feszültség létrejöttét. A helyi nyírószilárdság értéke azonban az élettartam előrehaladtával fokozatosan csökken, így bizonyos esetekben a kopási folyamat felgyorsul (ld.: 19. ábra).

3.2.2. Vegyes kopási folyamatok

Vegyes kopási folyamatokról beszélünk akkor, amikor valamilyen speciális üzemeltetési körülmény miatt, néhány domináns kopási mechanizmus időben egyszerre okoz jellegzetes tönkremenetelt. [1]

A *tribokorrózió* alapvetően a súrlódásból levezethető tönkremeneteli forma. Legtöbbször kis amplitúdójú (1-5000 μm) rezgésből alakul ki, de előfordulhat kisebb méretű, ugyanakkor nagy terheléssel kapcsolt alkatrészek dilatációja miatti kisfrekvenciás mozgásokból. A károsodás mértéke a frekvencia növekedésével növekszik, így a 100 Hz-et megközelítő, rövid úthosszú alternáló, súrlódó mozgásokat már erős oxidáció kísérheti. [1];[42] A felületen általában ki tud alakulni az adhézió, létrejönnek a kopástermékek, de a kis mozgástér miatt nem tudnak a felületek közül kiperegni, ami felgyorsítja az abrázív kopást. Az állandóan felsértett felület így a jótékony hatású passzíválódásra sem képes, és a „fémiszta” felületeken utat enged a további adhéziós folyamatoknak és a környező közeg korrozív anyagainak (pl.: oxidok, savas és bázikus gyökök stb.).

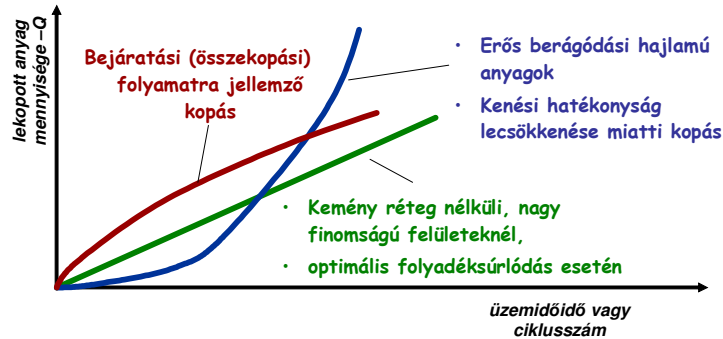
*Mechano-kémia*ilag módosított kopás esetén a felületi határrétegek kémiailag módosítottak, így a felületen különösen nagy nyomások esetén egy jellegében más, megfelelő élettartamot biztosító kopási folyamat játszódhat le.

Bizonyos fémeknél a szárazsúrlódás a felületet (a felületi szabad valenciák kialakulásával [1]) kémiailag aktiválja, így az a levegő oxigénjével kemény oxidokat képez, és kemény védőréteget alakít ki, csökkentve ezzel a súrlódási tényezőt és megakadályozva a felület alatti réteg berágódását. A fémek felületének passzíválódása lényegében egy „öngyógyító” folyamat, az előzőhöz nagyban hasonló mechanizmus, azzal a különbséggel, hogy a súrlódási teret körülvevő közeggel való kapcsolat itt segíti a passzíválódást. [1] A kemoszorpció révén módosított felületen a súrlódási tényező közvetlenül csökkenthető a kenőanyag és a felület kémiai kölcsönhatásával létrejövő módosított anyagréteg folytán.

3.2.3. Az egyenértékű üzemidő fogalmának bevezetése a kopásintenzitás értelmezésével

A súrlódásban résztvevő felületeken a fenti kopási mechanizmusok keveredve játszódnak le, így a szerkezet tényleges élettartama legfeljebb a domináns hatásokkal hozható összefüggésbe. A kopás sebessége így a szerkezet üzemideje alatt változhat. A leggyakoribb sebesség-lefutási formákat mutatja a 19. ábra három jellegzőgörbéje.

A kutatás későbbi szakaszában az igénybevétel intenzitása és az összehasonlítható intenzitású (standardizált, egyenértékűvé tett) igénybevételi idő fogalmának tematikus bevezetése szükséges, amelynek tárgyalását és későbbi alkalmazását a kopás mechanizmusán keresztül dolgoztuk ki.



19. ábra A kopásfajtáktól függő, jellegzetes kopássebesség lefutások ([1]- irodalom ábrája felhasználásával)

Amennyiben a kopásintenzitás fogalmával és jelentésével akarnánk jellemezni a folyamatot, akkor a kiesési ráta függvényekhez hasonló lefutású görbékhez jutnánk (ld.: 20. ábra). A kopásintenzitás a kopási részecskék mennyiségének (Q) élettartam-idő (t) szerinti deriváltjaként értelmezhető. A mértékegység az igénybevétel intenzitásától függő tömeg/üzemidő hányadosként adódhat megközelítőleg állandó (vagy állandó mintázat/ciklus szerint változó) terhelési viszonyok esetén.

$$q = \frac{dQ(t)}{dt} \left[\frac{\text{tömegvesztés}}{\text{üzemidő}} \right] \{2\}$$

Változó igénybevételi intenzitás esetén a leíráshoz valamilyen fajlagosított mennyiséget, egy standard terhelésre vetített „*egyenértékű üzemidőt*” kell kiszámítani. Ebben a terhelés mértékével és a terhelési környezet előnytelenységével súlyozott üzemelési idő alapul vétele célszerű.

Erre azért van szükség, mivel nem garantálható, hogy a jelenlegi kopásintenzitás elemzésénél, vagy a későbbi fejezetekben az élettartam elemzéseknél (Wöhler-féle élettartam-terhelés vizsgálatoknál, vagy az élettartam függvényeknél történő megfigyeléseknél), konstans, vagy azonos terhelési lefutás várható a teljes működési szakaszban. Az egyedek valós életében lesznek nagyobb igénybevételt jelentő ciklusok (rosszul kent, extrém hőmérsékleti viszonyok, szennyezettebb közeg) és könnyebben elviselhető ciklusok. Ha ezeket azonos körülménynek feltételezzük, félrevezető görbéket kapunk, és hamis következtetéseket vonunk le. Amennyiben bevezetjük a fenti fogalmat, és a hozzá tartozó számításmód alapján adaptáljuk más élettartam elemzéshez, a tönkremeneteli sajátosságok pontosabb leírására, helytállóbb összehasonlításokra nyílik lehetőségünk. (Pl. a kutatási munkában a más jellegű igénybevételek élettartam adatainak elemzésénél.)

$$t_e = t \cdot b \cdot k \quad \{3\}$$

ahol:

t_e – egyenértékű üzemidő

t – a tényleges üzemelési időszak, amelyen belül a súlyozó faktorok

azonosnak tekinthetők

b – a terhelés mértéke szerinti faktor egy referencia terheléshez viszonyítva a vizsgált időintervallumban pl.: 1-5-ös szubjektív skálán

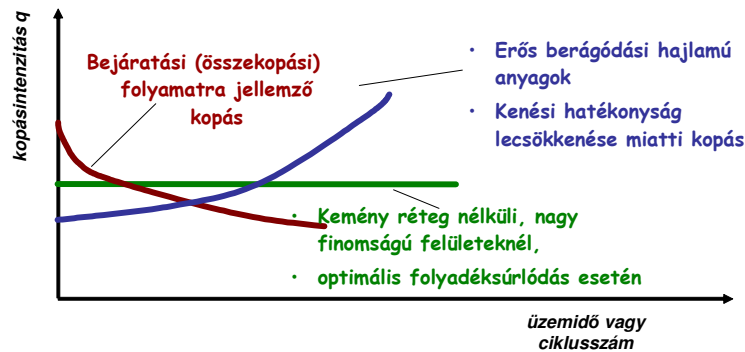
k – a környezeti hatás erőssége szerinti faktor egy vizsgált időintervallumban, ami a tönkremenetelt gyorsíthatja (1-5-ig), vagy akár lassíthatja (1-0,1-ig) szubjektív skálákon

A diagram elkészítéséhez az azonosnak tekinthető üzemelési feltételekkel (b és k faktorok) jellemzett t_i időtartamra kiszámítható a q_{ei} aktuális kopásintenzitás.

$$q_{e_i} = \frac{Q_i}{t_{e_i}} \left[\frac{\text{tömegvesztés}}{\text{egyenértékű üzemidő}} \right] \quad \{4\}$$

Kérdés lehet az egyes élettartam-szakaszoknál létrejövő anyagvesztés (Q_i). Ez a kopás körülményeire jellemző kopásintenzitás (q_{ei}) és az üzemelési időből kalkulált (t_{ei}) egyenértékű üzemidő alapján becsülhető. Mindezekből következik, hogy a tönkremenetelt előidéző kritikus tömegvesztés (Q_{krit}) a különválaszható élettartam-szakaszonként létrejövő tömegvesztések összege.

$$Q_{krit} = \sum_{i=1}^n q_{e_i} \cdot t_{e_i}$$



20. ábra A jellegzetes kopásintenzitás lefutások

A valós kopássebesség lefutásokat természetesen a változó terhelési és üzemelési feltételek, az alkalmazott kenőanyagok mindenkorai kenési hatékonysága, valamint az elvégzett karbantartási folyamatok határozzák meg.

A kopásintenzitás tekintetében a 20. ábra szerint is három különböző lefutás különböztethető meg:

A **folyamatosan csökkenő kopásintenzitás** olyan kopási folyamatoknál figyelhető meg, ahol a gyártási, üzembe állítási fázis rendellenességei miatt a felületen eltérő terhelési viszonyok adódnak. Ezek az inhomogenitások – legtöbbször gyártási, installálási hibák – aztán a használat során kiegyenlítődnek, így a felület-párok összekopnak, egymás optimális munkaterévé válnak, így a kopás mértéke is csökkenést mutat. Amikor a bejárási után a stabil viszonyok kialakulnak, a kopásintenzitás a felület-párokra jellemző értéket vesz fel, esetleg stagnál.

Állandó kopásintenzitás alakul ki, mennyiben a felület-párok csúszási tulajdonságai már az üzembe állítás során optimálisnak mondhatóak. Ilyenkor az intenzitás várhatóan az élettartam előrehaladtával sem fog változni, a bejárási időből adódó kezdeti változás nem lesz érzékelhető.

A konstans kopásintenzitás kialakulásának további feltétele, hogy az élettartam során lekopó felület tulajdonságai a mélység függvényében ne mutasson különbséget, homogén legyen.

A **kopásintenzitás felgyorsulását** jellegzetesen két tényező okozhatja. Az egyik a súrlódásban résztvevő anyagpárok valamelyikének idővel arányos tulajdonság-változása, rendszerint a degradációja. Polimereknél ez pl. a megvilágításból adódó UV expozíció, termikus vagy vegyi hatások miatt létrejövő molekulaszervezeti degradáció, míg fémeknél vegyszerek hatása, a korrózió felgyorsulása vagy a helyi felkeményedések miatti egyenetlenségek kialakulása és végső soron az érdesség növekedése.

A másik tényező lehet, ha a szándékosan kopásállóbbra kialakított elsődleges teherhordozó réteg elhasználódik, lekopik. Vagyis növekvő kopásintenzitást produkál egy kopás ellen felületkezelt test, hiszen a módosított réteg elhasználódásakor, sérülésekor megszűnik a nagyobb kopásállóságú réteg, majd a nem módosított réteg veszi át a terhelést. Ez utóbbi viszont rendszerint kisebb kopásállósággal rendelkezik, hiszen más funkcióra tervezték.

3.3. Kifáradás

Kifáradásnak nevezik azt a folyamatot, amikor a szerkezetet a folyáshatára alatti igénybevételi szinten, de nagymennyiségű terhelési ciklus elviselése után törést szenved. A kifáradás nem minden ciklikusan ismétlődő terhelési szituációkban jelenik meg. A jelenség vizsgálatának és értékelésének legismertebb módja az azonos körülmények között, különböző terhelések mentén, az egyedek tönkremenetelét számszerűsítő *Wöhler görbék* felvétele.

A relatíve kis terhelési szint esetén sem mondható, hogy a kristályszerkezet minden elemi része kizárólag rugalmas alakváltozást szenvedne. Az eltérő orientáció, kristályhiba miatti gyenge hely stb. végett diszlokáció jelenhet meg. Minden ismételt igénybevétel újabb elemi mértékű maradó változást okoz a szerkezetben. Egy kritikus feszültség szint felett és hibagyűjtő hely megléte esetén a deformált kristályok részaránya megnőhet, és az alakváltozó képesség helyi kimerülését, az anyag felkeményedését okozhatja. Az elviselt ciklusok számának emelkedése folytán a helyi feszültség-gócban (apró zárvány, kiválás, vagy kristályközi korrózió gyakran kiváltó ok) a szilárdságot is elérheti a gátolt deformáció miatti feszültségnövekedés, ami egy mikroszkopikus repedést indít el. Ha a feszültségek továbbra is ciklikusan jelentkeznek, és mindig ezen a hibahelyen csúcsosodnak, a repedés tovább növekszik. A hibahelyek további megjelenésével, valamint a mikroszkopikus repedések folyamatos terjedésével a teherviselő keresztmetszet annyira lecsökkenhet, hogy az anyag túlterhelése miatti szakadás, törés fog bekövetkezni.[43]

3.4. Törés

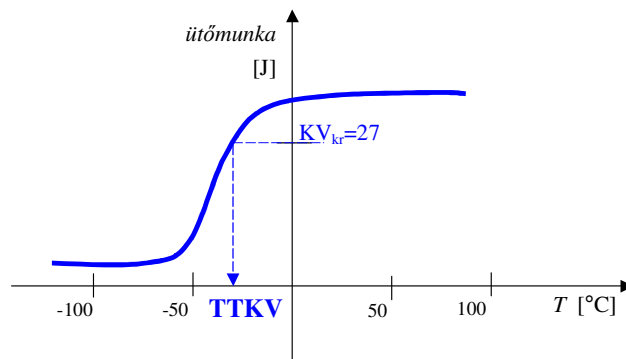
A törés az anyagban akkor alakul ki, amikor a külső terhelések hatására kialakuló feszültségi állapot meghaladja a szilárdságát. Ennek a túlterhelésnek a kialakulása nem feltétlenül élettartammal és természetes elhasználódással kapcsolatos kérdés, így tárgyalását csak egy aspektusból, érintőlegesen vizsgáljuk.

Fémeknek és fémötvözeteknek a felhasználás számára kedvezőtlen tulajdonsága a *ridegtörés* jelensége. A jelenség a valóságban úgy megy végbe, hogy a szerkezet különösebben nincs is igénybe véve, és maga a törés képlékeny alakváltozás nélkül történik meg.

A külső igénybevétel hatására normálisan diszlokációk jelennének meg, halmozódnának, terjednének, így a deformáció fokozódó energiaigénye jelentős mechanikai munkát emésztene fel, szívósságot kölcsönözve a fémszerkezetnek.

Egy kritikus hőmérsékleti érték alatt a fent leírt, energiaigényes anyagszerkezeti változások nem tudnak bekövetkezni. Fémeknél a diszlokációk mozgásához és a kristallitok deformációjához a kristályrács spontán rendeződését segítő rezgésének amplitúdója túl alacsony, így a kristályhibák a diszlokációk mozgását akadályozzák. A deformáló hatás megjelenésekor a kristallit kritikus helyén a nagy belső feszültség miatt mikrorepedés indul meg, aminek éles végződése a későbbiekben feszültséggyűjtő gócként működik. A repedés végénél a rendkívül magas feszültség nem tud hatékonyan diszlokációkat indítani. Mivel a képlékeny deformáció elégtelen mértékű, ezért a repedés terjedését csak alacsony ellenállás, kis mennyiségű energia felemésztése kíséri. Ez a ridegséget jelentő jellegzetes törés.

A ridegtörés vizsgálatokor a próbatesteket ütveszakító géppel eltörjük, és közben a töréshez felhasznált energiát számítjuk. A kapott energia értékek (J) erősen hőmérsékletfüggők. Jellegzetes, a ridegedésbe való átmenetet kimutató görbét ábrázol a 21. ábra, amelyet Charpy-féle ütvehajlító berendezésen végzett vizsgálatokkal vehetünk fel. Itt egy meghatározott ütőmunka értékhez állapítjuk meg az átmeneti hőmérséklet értékét (TTKV).[16], [30]



21. ábra Az ütőmunka értékei eltérő hőmérsékleten mérve és az ún. „átmeneti hőmérséklet” (TTKV) leolvasása

A KV_{KR} értéke általában egy tapasztalati érték (pl.: 27 J). A leolvasott átmeneti hőmérséklet (TTKV) értékénél magasabb hőmérsékleten használva az anyagot nem kell ridegtörésre számítani. [30] Általában el lehet mondani, hogy a ridegtörés jelensége alacsony hőmérsékleten, dinamikus igénybevétel és több tengelyű feszültségi állapot alatt fordul elő gyakrabban. [43]

Polimereknél hasonló a mechanizmus, csak nem a diszlokációk terjedése, hanem a makromolekulák másodrendű kötéseinek retardált átrendeződése, vagy a molekulaláncok szétszűszása okozza az energia elnyelését. Üvegességi hőmérséklet alatt még csak a szegmentális hőmozgás sem segíti az átrendeződést (és így az energiaelnyelést sem), ezért nagy eséllyel a molekulaláncok közötti másodrendű kötések, vagy maguk a molekulák szakadnak el.

A ridegtörés határát jellemző hőmérsékleti érték a szerkezet korának előrehaladtával rendszerint változik. Fémeknél a ciklikus igénybevételek miatti fáradás, korróziós hatások, gázok öregítő hatása miatti fokozatos ridegedés, radioaktív sugárzás okozta kristályszerkezeti károsodás fokozatosan emeli az átmeneti hőmérsékletet. Amikor ez a növekedés eléri a használati hőmérsékleti tartományt, a ridegtörés könnyen bekövetkezhet. A szerkezet élettartama tehát összefügg a TTKV folytonos emelkedésével.

Polimereknél a ridegséget a molekulaláncok öregedés miatti darabolódása okozza, így az élettartamot a kémiai degradáció előrehaladása határozza meg.

3.5. Korrózió

A korróziós folyamat egy olyan fázishatár-reakció, amely a fémek előállítására létrehozott redukációs folyamat spontán visszaalakulása. Ennek során a fém a felület irányából az anyag belseje felé a környező gáz vagy folyadék közeggel – esetleg szilárd felületekkel – lép reakcióba, és hoz létre oxidokat, szulfidokat, foszfidokat, karbonátokat, mint stabilabb vegyület alakjukat. A korróziós folyamat alapmechanizmusa, hogy a fémrács atomjai a fázishatárokon a rácsokból kilépnek, így a felület folyamatosan leépül. [25]

A korrózió sebessége nagymértékben eltérő lehet. (Pl. az alkáli fémekkel szemben a nemesfémek szabad levegőn mutatott reakciósebességeire – mint az elektródpotenciál sor két szélsőséges tagjai – gondolva.) A korrózió előrehaladása az anyagtartalom csökkenéséhez, szilárdságcsökkenéshez, rugalmasságuk elvesztéséhez, felületi struktúrájuk megváltozásához vezet. Két alapvető formája a kémiai és az elektrokémiai korrózió.

3.5.1. A korrózió fajtái

A **kémiai korrózió**nál a fém felületének ionjai a környező gáztomokkal, valamint elektromosan semleges folyadékmolekulákkal hoznak létre kisebb szabadenergiájú vegyületeket. A felületi határretegben a fém oxidációja és a korrodáló közeg redukciója egyszerre megy végbe. A fém korrózióval szembeni ellenállását a szabadenergia különbségei, a reakcióban résztvevő elemek korróziós rétegben mutatott diffúziós sebessége, és a kialakuló korróziós termékek struktúrája határozza meg. [25] Ez a térbeli struktúra (mint porozitás, egybefüggőség, kémiai stabilitás), amely viszonylag hamar ki tud alakulni a fémtiszta felületen, védi a fémet a további reakciótól, így jótékony, „passzíváló” hatása lehet.

Az **elektrokémiai korrózió**nál a fém felülete – legtöbbször vizes – elektrolittal érintkezik, így az oldott fémion és a szintén oldott állapotú oxidáló elem ionja egy közös oldószer rétegben van jelen. Ebben a rétegben az oxidáció és redukció helyileg elkülönülten, egy helyi galvánelemhez hasonló mechanizmus keretében valósul meg. Az elektrolit és a fémfelület potenciálkülönbsége okozza a fémionok leválását és az oxidációs termékek felületre kötődését.

Savakban vagy lúgokban létrejövő korrózió további hatással is károsítja a fémeket. Bizonyos esetekben a keletkező atomos állapotú hidrogén a felületbe diffundál, és a fém öregedésének nevezett folyamatot indítja el. A savas maratással járó felület-megmunkálási folyamatok, vagy a másként jelen levő savas közegek így potenciális veszélyt jelentenek a fémekre, azok elrögzedését, élettartamuk rövidülését okozva. [25]

3.5.2. A korrózió megjelenési formái

Egyenletes felületi korrózió esetén a felület különösebb zavaró hatásoktól mentes leépülése a néhány ezred mm/év anyaglehordási sebességtől az agresszívebb közegben levő, kevésbé ellenálló acéloknaál a néhány tized mm/év sebességig változhat. Jól felismerhető és – az egyenletesség miatt – nem túl veszélyes tönkremeneteli forma, amely ellen hatékony védekezési módok és vizsgálati módszerek ismertek. [1]

Helyi korróziónál (**lyukkorrózió, pitting**) az ötvözetben tapasztalható koncentrációkülönbségek a felület kristályszerkezetében helyi inhomogenitásokat okoznak. Lokálisan felgyorsuló korrózió indul, amelynek repedés keletkezése lehet a következménye. Az így kialakuló feszültséggyűjtő göcök a szilárdságot és az élettartamot nagyban befolyásolhatják. Vékony lemezek, savas közegben működő vagy szakszerűtlenül tisztított szerkezetek gyakori tönkremeneteli formája.

Kristályhatár-menti (interkristallin) korrózió alakul ki, ha az ötvözetben előforduló szennyezőanyagok, vagy az ötvözők atomjainak diffúziója a kristallitok határain kiválásokat eredményez. Amennyiben ezek a kiválások elektródpotenciálja nagyban eltér az alapfémétől, elektrokémiai korrózió indul, ami a kristallitok szétválásához vezethet. A durvább kristályokat tartalmazó anyag összes kristallit felülete kisebb, így a rajtuk kialakuló szennyezőanyag koncentrációja nagyobb lesz. Az élettartam így a szennyezők mennyiségén és a szemcsenagyságon, valamint a szemcsehatárok szétválását serkentő mechanikai feszültségen is múlik. [1], [25]

Feszültségkorrózió okoz problémát a kristályokon keresztülhaladó (infrakristallin) korróziónál, amelyik kiindulási forrása egy kristalliton belüli hibahely, vagy diszlokáció-torlódás, ahol a megnövekedett feszültség növekvő helyi szabadenergiát hoz létre. Ez helyileg felgyorsítja a korróziót, az anyag folytonosságának bomlását, tehát a feszültségi repedés kialakulását és terjedését. A külső mechanikai terhelés tovább növeli a repedések esélyét, csökkentve így az élettartamot. [1], [25] A kifáradást okozó, ciklikus igénybevételek miatt kialakuló kezdő hibahelyek is többnyire erre a mechanizmusra vezethetők vissza.

A **súrlódási korrózió** bár kémiai jellegű tönkremenetel, alapjában a súrlódás hozza létre (tribokorrózió), így tárgyalása is a súrlódással foglalkozó fejezetben került elő.

3.6. Polimerek jellegzetes mikroszerkezeti tönkremenetele

Az öregedés, azaz a szerkezet élettartamának végéig tartó folyamatos és egyre gyorsuló leépülése, leginkább a polimerek jellegzetessége. A természetes vagy mesterséges eredetű monomerekből vagy oligomerekből mesterségesen felépített polimerjeink nem nevezhetők stabil szerkezetnek, így idővel a bonyolult rendezettség spontán módon visszaáll, a makromolekulák lebomlanak, tárgyaink és anyagaink használhatatlanná válnak.

Leggyakrabban a makromolekulákkal, azok térhálóba, kristályokba szerveződött formáival is összefüggő, jó szilárdsági, rugalmassági vagy éppen a képlékeny alakíthatósági tulajdonságok leromlása – törékenység, ridegség, kis szilárdság – következik be. Olyan kísérő jelenségek is közismertek, mint az optikai tulajdonságok megváltozása: mély színük kifakulása, sárgulás, víztiszta átlátszóság elhomályosodása, mattulás, érdesedés. Mindezek kémiai változásokra vezethetők vissza, amelyeket az alábbi csoportokba lehetne sorolni. Mivel a szerkezetek több károsító hatásnak egy időben vannak kitéve, ezért az alábbi degradációs formák sem kizárólagosan jelentkeznek.

Az öregedéskor bekövetkező bomlást előidéző tényezők szerint fizikai és kémiai hatások szerinti feloszlást mutatja az alábbi táblázat [68]:

2. táblázat A molekulák bomlását előidéző hatások csoportosítása

<i>fizikai előidéző hatás</i>	<i>kémiai előidéző hatás</i>
mechanokémiai	oxidatív
fotokémiai	hidrolitikus
termikus	enzimes
nagyenergiájú sugárzás	

Fizikai hatás esetén a molekulaszervezet bomlása úgy jön létre, hogy a molekulák termikus hatásból, belső mechanikai feszültségből vagy az abszorbeált fotonoktól származó energiája a lánc valamely részén lokálisan meghaladja az elsőrendű kötés energiáját. Ez kialakulhat a láncon, vagy a szubsztituensek rögzítési pontjainál.

Az élettartamot befolyásoló események között szerepel maga a gyártási folyamat, valamint a felhasználási környezet. Ezeknél jelentős nagyenergiájú sugárdózisnak (szabadtéri felhasználás), mechanikai hatásnak (gyártáskori orientálás, egyéb nagymértékű deformáció), vagy magas hőmérséklet (plasztikálás, tisztítás, forró felhasználási környezet), valamint azzal együtt járóan a levegő oxigénjének oxidatív tulajdonsága.[68] Mint azt később megemlítjük, a víztisztításban például vannak technológiák, ahol, a szennyezést okozó molekulák kémiai lebontása érdekében, a nyersvízben jelen van oldott atomos oxigén vagy az ózon, amely folyamatos káros hatást fejt ki a tisztítást végző polimer membránokra.

3.6.1. A polimerek öregedésének okai

A leépülésnek több, az alábbiakban rendszerezett formája lehetséges, de valamennyi a láncok rövidülésével, darabolódásával jár. A leépülés kiváltó okaiként az alábbiakat említhetjük. ([26]-nyomán)

- **Mechanikai degradáció** következik be általában a rossz beállítási paraméterekkel (hőmérséklet, nyújtás, deformációs sebesség, ...) működő műanyag-feldolgozó technológiában, de a túlterhelést jelentő felhasználás során is. A hosszú szénláncokat rögzítő másodrendű kötések összes energiája nagyobb lehet, mint a láncban levő elsőrendű kötés energiája, így bizonyos terhelési helyzetekben a láncok mechanikai szakadása következhet be. A szabad láncvégek – mint reakcióképes szabadgyökök – degradációs folyamatokat indíthatnak be. Különös problémát jelent ez a szintetikus fonalgépnél, ahol nélkülözhetetlen lépés a polimerizációt követően az orientálásnak nevezett, 100%-ot jóval meghaladó nyújtás. Ekkor az elimináció miatt a kristályos részek rendezettsége sérül, így a kristályos részarány csökken, ami a szilárdságot károsan befolyásoló jelenség.[49]
- **A termikus degradáció** különösen a termoplaszt polimereket károsíthatja. A hőmérséklet növelésével is elérhető, viszonylag kisenergiájú gerjesztés hatására reakciók indulnak meg. A *depolimerizáció* a hidrogén lehasadásával szabaddá váló makro- szabadgyökök további reakciókat gerjesztenek, ami lánctördelődéshez vezet. Az elimináció során kisebb molekulák (ezek közt monomer egységek is) leválása jöhet létre a molekula bármely pontján, egyforma statisztikai valószínűséggel.[68]
- **Fotodegradációnál** a reakciókat a fény, mint energiakvantum iniciálja. Ekkor a nagyenergiájú (minimálisan az UV fény energia) sugárzás rezonanciába tud lépni a kötő elektronpárokkal, és szétszakíthatja azokat. Gyakori gyenge pontok a telítetlen helyek a láncon, vagy bizonyos szubsztituensek. Bizonyos polimerekben a telítetlen kötések már a látható, valamint a Nap sugárzásából származó UV fény hatására is bomolhatnak, és okozhatnak lehasadásokat vagy láncdarabolódást.
- **Kémiai degradáció** során általában magas feldolgozási hőmérséklet, vagy valamilyen rendellenes hőhatás és savat, bázisokat, reaktív gázokat, oldószereket tartalmazó közeg együttes hatása váltja ki a láncok tördelődését.

- **Nagyenergiájú sugárzás miatti degradációnál** a besugárzás a makromolekulákon már bárhol, kötési energiától függetlenül okozhat lehasadás és lánctarabolódás miatti szabad gyököket. Az intenzitás függvényében kialakuló kisebb-nagyobb mennyiségű szabad gyök további degradációs folyamatokat indíthat el.

3.6.2. A polimerek öregedésének lehetséges mechanizmusai

A degradáció mechanizmusa szerint a következő csoportok különíthetők el. Ezek közül valamennyinél az *iniciálással* indul a reakció, vagyis egy problémás kötésnél túlzott energiaszint-növekedés alakul ki, amely során szabad gyök keletkezik. A *propagáció* a molekulaláncok sorozatos leépülését, tördelődését okozza, míg a gyökös *reakciólánc záródása* állítja meg a folyamatot.

- **A depolimerizáció** során akár a monomerré való végső lebomlás is elképzelhető bizonyos polimereknél, és általában termikus degradációnál alakul ki. Ez az öregedési forma a láncvégeken kezdődik, és a szüntelen monomer lehasadásokkal emészti fel a makromolekulát. Halmozódó behatásoknál szinte egyszerre széteső polimerláncot is tapasztalhatunk. [22] A folyamat a láncról hidrogén lehasadásával kezdődik, majd a létrejövő szabadgyök újabb reakciókat képes generálni. Kellően stabil, ezért ellenálló polimerek ezzel a mechanizmussal szemben azok, melyek lineárisak és nem elágazóak, vagyis primer és szekunder szénatomok találhatóak rajtuk; a lánc kisebb sérülésekkel, de egyben túléli az ilyen reakciókat. Legalábbis lánc tördelődés a képződött szabadgyökök kis száma miatt „befullad”. Elágazásokat – azaz terciér és kvaterner szénatomokat – is tartalmazó láncoknál az ilyen helyeken való láncsérülés a kritikusnál nagyobb szabadgyök képződéssel jár, és így a lánc tördelődés gyakoriságának folyamatos növekedését okozza. A láncvégi kettőskötéseket tartalmazó makromolekulák (általában gyökös polimerizáció során) kevésbé mutatkoznak stabilnak, mint amelyek nem rendelkeznek ilyenekkel (ionos polimerizáció során). Kopolimerizáció, valamint a láncvégi molekulacsoportok módosítása során lényegesen ellenállóbb polimerek állíthatók elő. (Pl.: PMMA, POM) [26]
- **Az elimináció** alkalmával a szubsztituens egyik kettőskötése, vagy a szénlánchoz kötést biztosító kötése szintén termikus okokból sérül, lehasadhat a makromolekuláról, és kismolekulás, sokszor káros vegyület jön létre, amely tovább károsítja a polimert, valamint a környezetét². (Pl. migrálással ez a lánc több helyén is káros hatásokat képes kifejteni. [22]) A polimerlánc szabálytalan szerkezetű részein, instabil atomoknál található ilyen gyenge helyek. (Az elimináció tipikus példája a kevesebb lágúytót tartalmazó PVC, melynek a feldolgozásánál a nyírófeszültségek következtében lokális túlhevülés keletkezik, ami a degradációt elindítja.) [26] Elimináció alkalmával tehát a főlánc nem sérül, csak a kismolekulás anyagok lehasadásával a szubsztituensek alkotta szerkezet (pl. az optikai, higroszkopikus stb. tulajdonságok) változik meg előnytelenül. Máskor a lágúytót tartalmazó csoportok válnak le, így az eredeti kemény, rideg agyagtulajdonság tér vissza (pl. PVC). [22]

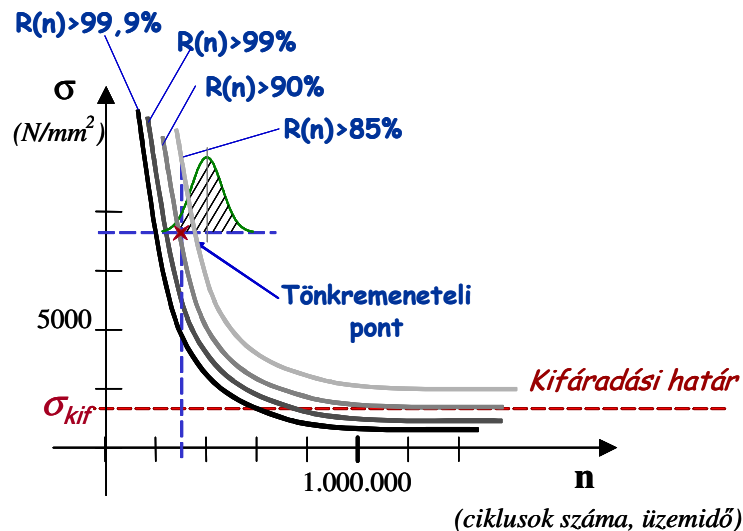
² pl. PVC esetén sósav hasad le, ami a technológiai berendezések fém alkatrészein korróziót, és más szerkezeti károsodást okozhat.

- **Láncördelődés, degradáció** jön létre, amikor nagyobb energiadózis alkalmazásával és aktív oxigén jelenlétében gyökös reakció indul. Ennek eredménye láncördelődés, amit néhány irodalom szűkebben értelmezett degradációnak nevez. ([22])
- Máskor pedig épp a reakciós csoport jellegzetes elhelyezkedése miatt további elsőrendű keresztetések létrejötte, vagyis nem kívánt **térhálósodás** indul el. Ez utóbbi különösen a plasztikusság és rugalmasság elvesztését, ridegség, törékenység kialakulását jelenti. [26]

4. Az élettartam számszerűsítése és az általánosan elterjedt élettartam-elemzési módszerek

4.1. Az élettartam és a terhelés összefüggése

Wöhler fémes gépszerkezetek elemzéseiben kimutatta, hogy különböző terhelési szinten üzemeltetett berendezések különböző élettartamot produkálnak, és a két paraméter között jellegzetes negatív korreláció mutatható ki. [43] Ezen görbéken (22. ábra) a vízszintes tengely az egyedek tönkremenetelt okozó igénybevételi ciklusok számát, míg a függőleges az elszennvedett közép feszültség értékét jelöli. A vizsgálat-sorozatoknál az azonos igénybevételű fárasztóvizsgálatok statisztikai elemzéséből adott túlélési valószínűséggel kapott élettartam értékeket kötjük össze egy közelítő görbével. Ez a görbesereg a későbbi élettartam-tervezésekhez is alapadatul szolgál. Fémek esetén megállapították, hogy a karakteres folyási jelenséget mutató „szívós” anyagoknál a lecsengő görbe aszimptótája egy olyan feszültségi szint, amely alatti igénybevétellel terhelve élete során az egyed a jelölt valószínűséggel gyakorlatilag nem kell a kifáradással számolni, az egyed gyakorlati értelemben végtelen igénybevételi ciklust fog elviselni. Ez a *kifáradási határ*.



22. ábra A Wöhler-görbe általános alakja és a különböző megbízhatósági szintekhez (R) tartozó görbék

4.1.1. Tervezési megközelítések

Kifáradási határra tervezéskor az elérendő cél, hogy a termék ne menjen tönkre a kifáradás miatt a „gyakorlati értelemben vett”, vagyis a termék szokásos használati idejét, erkölcsi élettartamát jelentő ciklusszám előtt. A kis terhelésű, de nagy használati ciklusszámú egyedek esetére alkalmazott elv tehát a kifáradást nem okozó maximális feszültségi szintet, és így a szükséges geometriákat jelöli ki.

Tartamszilárdságra tervezéskor pedig, egy tervezett feszültségshinthez, adott túlélési valószínűséggel adható meg a tönkremenetel időpontja, javítható egyedeknél a csere, bonyolultabb egységeknél a tervezett beavatkozás. Fordított esetben egy elvárt élettartamra, tervezhető csereperiódusra határozható meg a megengedhető feszültség szint. Ilyenkor a kifáradás létrejön, de elvárt megbízhatósággal a végzetes tönkremenetel megelőzhető.

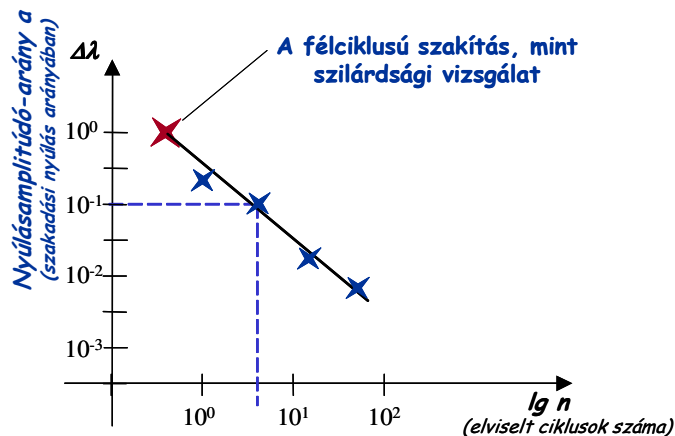
Wöhler fém alapanyagú gépelemekre kidolgozott elemzése sok esetben szélesebb körben is alkalmazhatóak, ahol a tönkremenetelt okozó terhelés/igénybevétel mértéke fordítottan korrelál az élettartammal. Eszerint a mechanikai terhelésre találhatunk analógiát a hőmérséklet, a vegyi környezet koncentrációja, a besugárzási dózis stb. károsító hatások esetén is. [25]

4.1.2. A tönkremenetelek fárasztási ciklusok szerinti felosztása

Anyagfáradásról minden esetben, időben ciklikusan változó terhelés hatására kialakuló halmozódó károsodás bekövetkezésekor beszélünk. Ekkor az üzemi élettartam alatt a feszültségek egy alsó, illetve egy felső feszültségszint között váltakoznak. (A σ_{\min} , σ_{\max} előjelei megjelenése alapján lengő és lüktető igénybevételeknek is nevezik.) A legtöbbször teljes tönkremenetel létrejöttéhez, azaz töréshez, szakadáshoz, vagy más folytonossághiány kialakulásához tartozó pillanat a kifáradási határállapot, az esetlegesen bekövetkező törés fáradt törés, vagy fáradásos tönkremenetel. Az előző fogalmak mellett a tönkremenetelt létrehozó ciklusok mennyisége és terhelési szintje alapján két, viszonylag jól elkülöníthető csoportot említenek a vonatkozó irodalmak. [1], [25], [43], [7]

Nagyciklusú (Wöhler féle) fáradás az, amikor az üzemi élettartam alatt fellépő terhelések okozta maximális feszültségszint nem közelíti meg a szerkezeti anyag folyási határát, vagyis a terhelések a rugalmas tartományban veszik igénybe a szerkezetet. Mivel a rugalmas deformációk miatt szinte elhanyagolhatóan kismértékű torzulások, diszlokációk jönnek létre, az emellett elviselhető és káros halmozódássá kumulálódó károsodási ciklusok száma nagy lesz.

Kisciklusú (Coffin-Mason féle) fáradás esetén a terhelési szint már jelentősen megközelítheti a maradó alakváltozásokat okozó folyási határértékeket, így a terhelések miatti kumulálódó károsodási ciklusok (és a kialakult károsodások) kisebb száma is a tönkremeneteli határállapotba juttatja a szerkezetet.[25]



23. ábra A kisciklusú fárasztások összefüggése Coffin–Mason kísérletei szerint

A fenti ábrán ciklikus hajlító–húzó igénybevételekkel terhelt vizsgálatssorozat kiértékelése látható, ahol a nyúlásamplitúdó a szakítóvizsgálatnál tapasztalt teljes nyúlás arányában van megadva. A logaritmikus skálák mentén egy egyenesre rendeződnek a tönkremeneteli pontok, vagyis a Coffin–Mason összefüggés megállapítása szerint, a deformáció mértéke alapján jól becsülhető az élettartamot jelentő ciklikus igénybevételek száma. [61], [34]

A vizsgálatokból kidolgozott tapasztalati összefüggés:

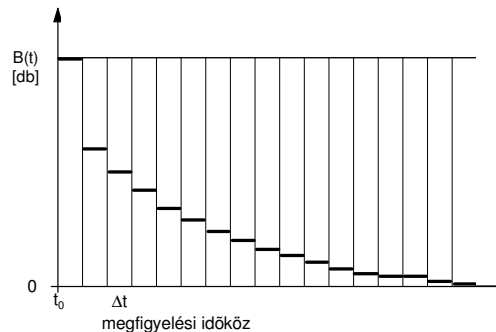
$$\Delta\lambda \cdot n^m = C \quad \{5\}$$

ahol a „ $\Delta\lambda$ ” az alakváltozás mértéke a szakadási nyúlás arányában, „ m ” a terhelés intenzitásától függő érték, míg „ C ” a szakadási nyúlásból adódó állandó. [61]

4.1.3. Az élettartamot statisztikailag jellemző függvények és becslésük valós adatokból

4.1.3.1. Az állományfüggvény és a túlélés valószínűségének becslése

Az állományfüggvény (mint időfüggvény) fejezi ki egy tetszőleges időpontban a működőképességnek számítható egyedek darabszámát. Ennek origója azt a „0” időpontot jelöli, amely valamennyi megfigyelt egyed használatának, igénybevételének kezdete. Vagyis az időfüggvény a használatba vételtől eltelt időtartamot (más esetekben üzemidőt, vagy elszendvedett igénybevételi ciklusok számát) jelzi tényleges gyakoriság, vagy a kezdeti darabszámra fajlagosított formájában. Az adatokat azonos tulajdonságokkal gyártott, azonos és stacioner körülmények közt terhelt, majd nyomon követett egyedekről tudatos adatgyűjtéssel szerezhetjük. A kezdeti pont (t_0) az üzembe helyezés pillanatát jelenti.



24. ábra Az állományfüggvény [34]

A túlélési valószínűség becslése a megfigyeléseinket tükröző állományfüggvény adataiból becsülhető, amennyiben a kérdéses t időpontban a működőképesség állományt a kezdeti mennyiségre vonatkoztatjuk.

$$R(t) \approx \hat{R}(t) = \frac{B_t}{B_0} \quad \{6\}$$

4.1.3.2. A kiesések valószínűségének becslése

Mivel a vizsgálatokat nagyban segíti, ha kétállapotú egyedekként kezeljük az elemzéseink tárgyát, kijelenthető, hogy a meghibásodás (kiesés) és a működőképesség (túlélés) teljes eseményrendszert alkot, ugyanakkor kizáró események. Ezt valószínűségelméletileg a

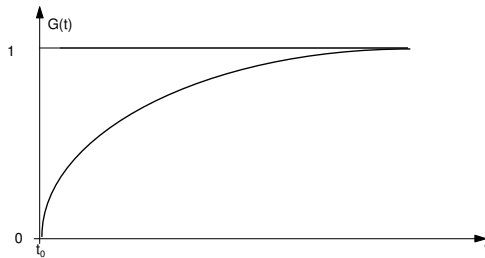
$$R(t) + G(t) = 1 \quad \{7\}$$

összefüggés fejezi ki. A megfigyeléseink számára az információkat természetesen a meghibásodott (kiesett) egyedek hordozzák, hiszen azokat tudjuk könnyen leszámolni, és a tönkremeneteleket műszakilag elemezni. A meghibásodási gyakoriság időfüggvényének

felvétele, és ebből a kiesési valószínűség eloszlásfüggvényének becslése az állományfüggvényből adódóan a

$$G(t) \approx \hat{G}(t) = \frac{B_0 - B_t}{B_0} \quad \{8\}$$

összefüggéssel történik, és általános alakként az alábbi függvényképet kapjuk.



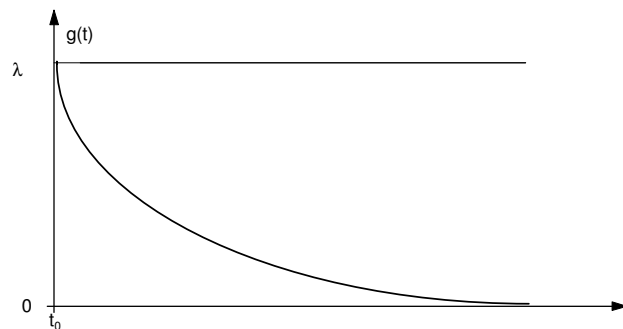
25. ábra A kiesési eloszlásfüggvény exponenciális eloszlásnál [34]

4.1.3.3. A kiesések sűrűségének becslése

Az egyes időszakokban az állományfüggvény változását, vagyis a megfigyelt időszakban történő kieséseket a kiesési sűrűség fejezi ki. Számszerűen ez a kezdeti állományra fajlagosított meghibásodási arányt mutatja. Az előző eloszlásfüggvény deriváltjaként is felfoghatjuk, amelynél igaz, hogy a folyamatosan csökkenő állomány egyre kevesebb kieső egyedet produkál, így az előzőből is levezethető becslése és általános alakja szerint:

$$g(t) = \frac{dG(t)}{dt} \approx \frac{\Delta \hat{G}(t)}{\Delta t}, \quad \{9\}$$

vagyis az állományfüggvényből $\hat{g}(t) = \frac{B_t - B_{t+\Delta t}}{\Delta t \cdot B_0}$. {10}



26. ábra A kiesési sűrűségfüggvény exponenciális eloszlásnál [34]

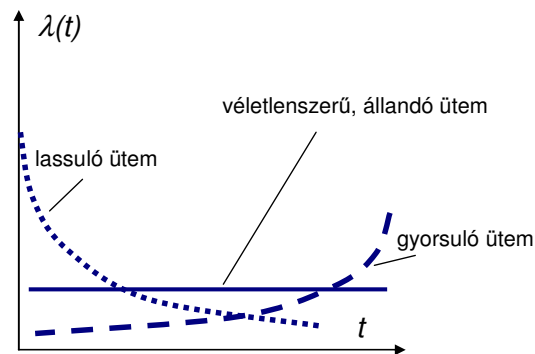
4.1.3.4. A kiesési ráta, mint az egyedek élettartam jellemzője

A kiesési hányad, vagy kiesési ráta fejezi ki a legjobban a kieséseknek, meghibásodásoknak a jellegzetességeit, és teszi szemlélhetővé azok megnövekedő gyakoriságát vagy ritkulását. Ennek oka, hogy nem a kezdeti állományra vonatkoztatja az egyes időszakokban kiesett egyedek számát, (mivel kisebb populációból természetesen egyre kevesebben hibásodnak meg,) hanem a kérdéses időszak elején még működőképésekre.

$$\lambda(t) = \frac{g(t)}{R(t)} \quad \{11\}$$

Ez már érzékeltetni képes az egyre növekvő kiesési hajlandóságot az öregedési időszak vége felé, vagy éppen a csökkenő ütemet a bejáratási szakaszban, az alábbi formulák és függvényképei szerint.

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\hat{g}(t)}{1 - \hat{G}(t)} = \frac{B_t - B_{t+\Delta t}}{\Delta t \cdot B_t} \quad \{10\} \text{ és } \{6\} \text{ szerint}$$



27. ábra A kiesési ráta függvényének jellegzetes alakjai az élettartam során állandó körülmények között [34]

4.2. Az élettartam-adatok jellegzetes statisztikai eloszlása

4.2.1. Egyedek exponenciális eloszlású élettartam adatokkal

Az exponenciális eloszlást természeti jelenségek, folyamatok leírására alkalmazhatjuk, ha igaz, hogy a vizsgált folytonos mennyiségnek egy intervallumon belül bekövetkező változása arányos a mennyiségnek az intervallum elején felvett értékével. Ezt geometriai értelmezésben (vagy elvontan a számegyenesen) a teljesen véletlenszerű elhelyezkedésnek is felfoghatjuk, és a "Poisson folyamat" fogalommal is magyarázhatjuk. [64] Bizonyos feltételek közt az élettartam adatok ilyen mennyiségeknek tekinthetők, hiszen az egyes egyedeknek egy élettartamot jelző skálán a tönkremeneteli valószínűség tekintetében nincs kitüntetett helyük, vagyis azonos eséllyel fognak tönkremenni fiatalabb és idősebb korokban is. [32]

Amennyiben az adatok (amelyek természetüknél fogva nem lehetnek negatívak) olyan egyedek élettartamát jelölik, amelyek véletlenszerűen, kizárólag egy adott időpontban jelentkező hatás eredményeként mennek tönkre, exponenciális eloszlásúak lesznek. Ezt úgy kell érteni, hogy a tönkremenetel nem valamilyen halmozódó károsodástól alakul ki, hanem valamilyen

véletlenszerűen megjelenő túlterhelés, vagy a teherbíró képesség véletlen lecsökkenése okozza. [32] Vagyis a múltbéli igénybevételek és események nem befolyásolják az egyed jelenlegi tönkremeneteli hajlamát, vagyis nem siettetik a meghibásodást, matematikailag igazolható az

$$\frac{B_{t_1+t_2}}{B_{t_1}} \approx \frac{B_{t_2}}{B_0}, \{12\}$$

ahol B_0 a kezdeti állomány [db], B_t pedig a t idő elteltével leszámolható működőképes állomány. [66] Ekkor igaz lesz, hogy a tönkremeneteli valószínűség értékeinek megadásával a túlélésre az

$$R(t_1 + t_2) = R(t_1) \cdot R(t_2) \quad \{12.1\}$$

feltételnek az

$$R(t) = e^{c \cdot t} \quad \{13.0\}$$

típusú függvények megfelelnek. Amennyiben a c konstansnak a kiesési ráta negatív konstans értékét feleltetjük meg az $R(t)$ függvény monoton csökkenő jellege miatt, a túlélési valószínűsége az

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \{13\}$$

függvényalakot, mint eloszlásfüggvényt kapjuk. [66] A túlélésnek a komplementer eseménye a meghibásodás, ezért a kiesési/meghibásodási eloszlásfüggvény:

$$G(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \{7\} \text{ és } \{13\} \text{ szerint}$$

A kiesési valószínűség függvény adott intervallumon belüli változásának relatív mértékét, azaz a kiesések sűrűségét a kiesési sűrűség függvény mutatja:

$$g(t) = \frac{dG(t)}{dt} = -\lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad \{9\} \text{ és } \{13\} \text{ szerint}$$

Az eloszlásra jellemző még, hogy a λ paraméter reciproka az adatsor várható értéke, azaz:

$$T_K = \frac{1}{\lambda} \quad \{14\}$$

Ezt várható élettartamnak vagy karakterisztikus élettartamnak is nevezik.

4.2.2. Egyedek Weibull eloszlású élettartam adatokkal

Amennyiben nem csak a véletlenszerűség jellemző az egyedek tönkremenetelében, hanem kitüntetett időszakok is adódnak a kiesések gyakorisága tekintetében, akkor már valamely élettartamot meghatározó tényező jobban dominál, ezért az exponenciális eloszlás feltételezése elnagyolt lesz. Kitüntetett időszaknak tekinthető például, ha a felületi réteg lekopása, bejáratódás, öregedési problémák megjelenése miatt az élettartam bizonyos szakaszában a kiesési arány megváltozik. [32] Ekkor célszerű áttérni a Weibull eloszlás alkalmazására. Ez az eloszlás egy helyett (az exponenciálisnál ez a „ λ ”) két vagy három paraméter segítségével

pontosabban tudja leírni a különböző tönkremeneteli jellegzetességeket mutató folyamatokat. Ezek a paraméterek³ [58]:

- T_K – karakterisztikus élettartam, skálaparaméter, esetleg mértékparaméter;
- b – alakparaméter; ennek 1-es értéke esetén az exponenciális eloszlás matematikai formulája, sűrűség és eloszlásfüggvényei adódnak.
- γ – helyzetparaméter (csak a háromparaméteres Weibull eloszlásnál)

4.2.2.1. Az adatok Weibull-eloszlásának leírása két paraméterrel

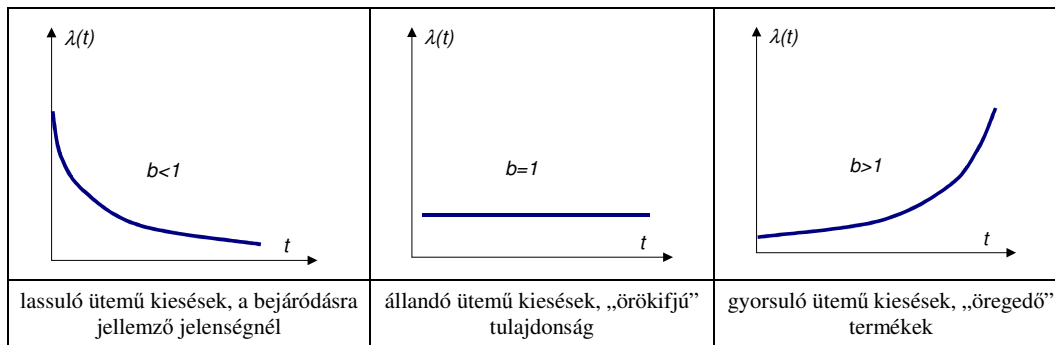
A legalább kétparaméteres leírasmóddal meghatározott kiesési ráta függvény már az olyan ellentétes jellegeket is tükrözi, mint a bizonyos termékeknél egyszerre (de különböző életszakaszokban) előforduló gyorsuló, lassuló és változatlan ütemű meghibásodási arányok.

Ezek legfontosabb függvényei a kiesésekig eltelő időtartamok – mint valószínűségi változó – eloszlásának függvénye, ahol a független változó idő, üzemidő, vagy ciklusszám

$$G(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T_K}\right)^b} \quad \{15\}$$

és a kiesési ráta függvénye: $\lambda(t) = \frac{b}{T_K} \left(\frac{t}{T_K}\right)^{b-1}$ {16}

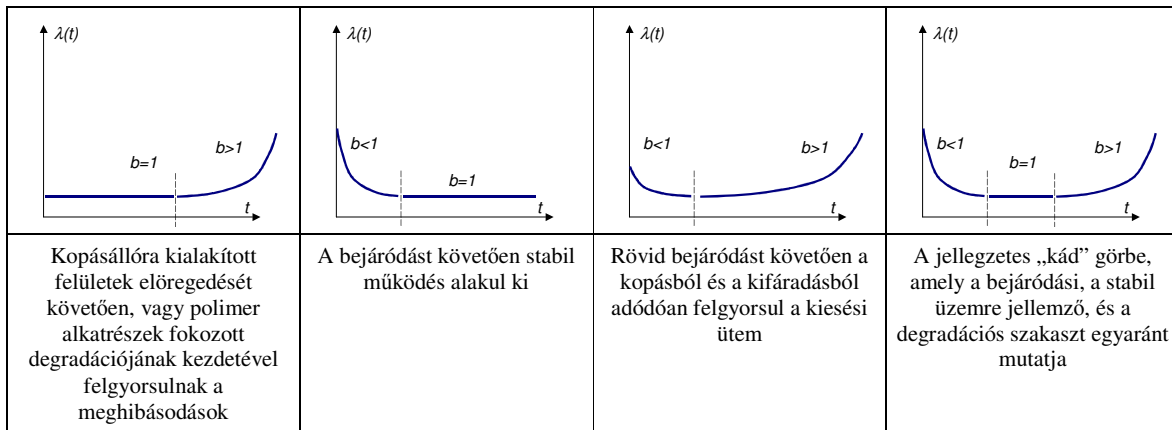
A kiesési ráta függvényének alakja egészen eltérő lehet az említett „b” szerint:



28. ábra A kiesési ráta függvény több jellemző alakja Weibull eloszlásnál, amelyben a „b”-alakparaméter a meghatározó

A valós kiesési folyamatokban a fenti görbék leginkább nem javítható termékek MTTF értékeihez használt adataiból rajzolódnak ki. Az ettől eltérő származású, pl. javítható egyedek meghibásodásai közötti időtartamokból már kevert eloszlási jelleget mutatva, nem tisztán egyféle alakparaméterrel jelentkeznek, hanem az élettartam előrehaladtával változhatnak is, jelezve, hogy a meghibásodásokat egy idő után más okok fogják hangsúlyosabban befolyásolni. [32]

³ A paraméterek jeleit a gyakorlatunkban alkalmazott egységesség érdekében módosítottuk, egységesítettük.

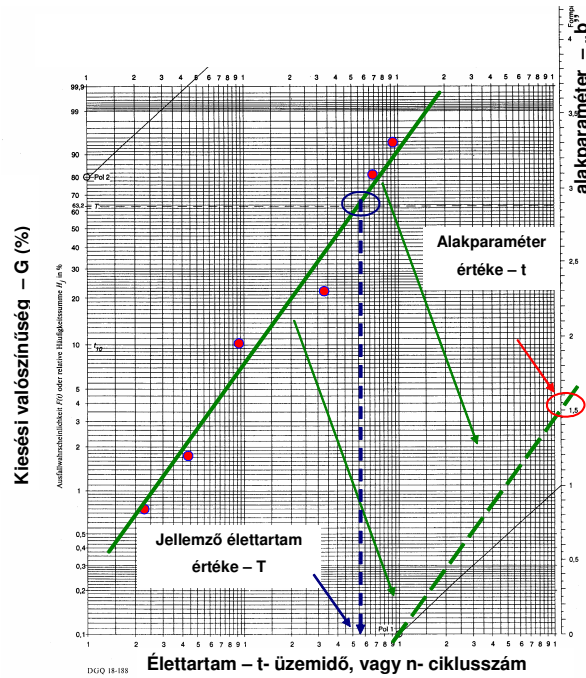


29. ábra Példák a kiesési ráta függvény több jellemző alakjára, amikor az élettartam előrehaladtával más-más okra vezethetők vissza a kiesések

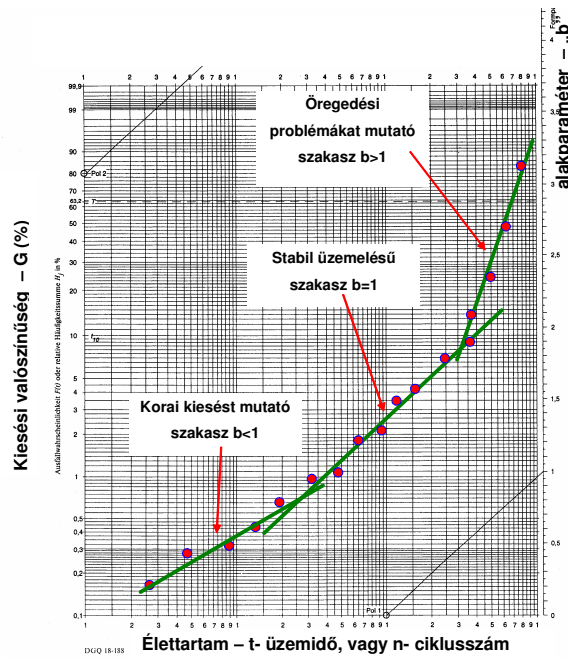
A meghibásodási ráta ismerete azért is fontos, mert nem csak a műszaki beavatkozásokat, hanem a vizsgálati módszereket és azok sűrűségét is tervezhetővé teszi. A későbbi fejezetben bemutatásra kerülő karbantartási stratégiákat, az állapotvizsgálatok és beavatkozások ciklusidőit egy másik élettartam-szakaszba érve mindig felül kell vizsgálni. [32], [41]

Az élettartam adatok, mint valószínűségi változók feldolgozása, és a belőlük levonható valószínűségi következtetések, becslések utáni igény olyan grafikus technikát fejlesztett ki, mint az élettartam hálón való megjelenítés. A gyakorlati alkalmazhatósága egyszerű, gyors és kellően pontos elemzést tesz lehetővé. Az élettartam szerinti osztályba-sorolást követően a kiesési valószínűségek tapasztalati értékeit a hálózaton pontokként kell ábrázolni, majd közelítő egyenest húzni köztük. Ennek segítségével a konkrét eloszlás alakparamétere és karakterisztikus élettartama, valamint kérdéses üzemidőkhöz kiesési valószínűségek becsülhetők. [1], [54]

Vannak esetek, amikor a tapasztalati adatok pontjai közé nem egy, hanem több egyenes szakasz illeszthető. Ez a működési idő szerint változó eloszlási paraméterű Weibull eloszlásra utal. A meredekségek jellegzetes változása alapján a 29. ábra szerinti rátafüggvény alakok, de akár a „kád görbe” is kirajzolódhat a hálózaton.



30. ábra Példa az élettartam háló használatára [38]
(általános egyszakaszú élettartam eloszlás)



31. ábra Példa az élettartam háló használatára [38]
(többszakaszú élettartam eloszlás – kádgörbe)

4.2.2.2. Az adatok Weibull-eloszlásának leírása három paraméterrel

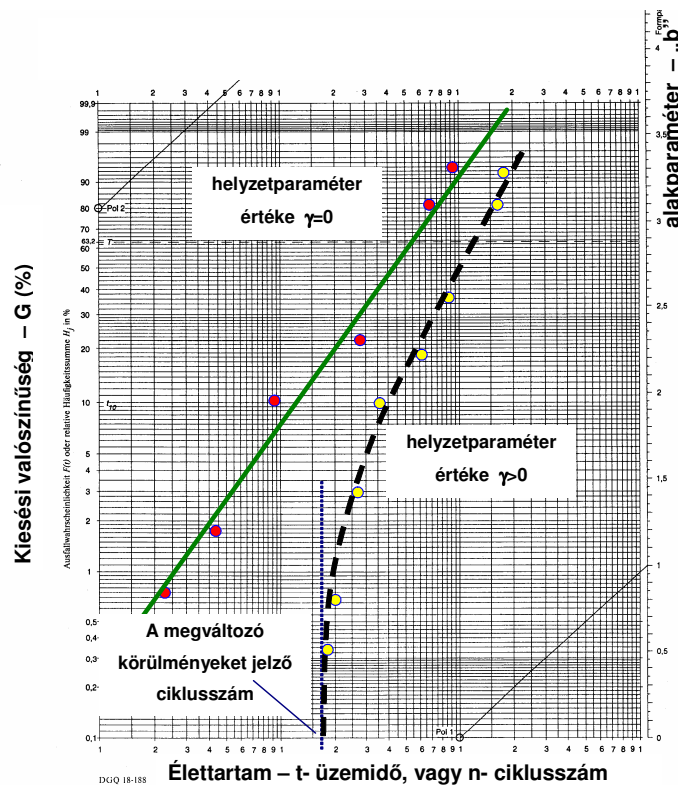
Esetenként az egyedek tömeges kiesésének statisztikáiban a kiesési ráta függvényének változását pontatlanul írja le a kétparaméteres Weibull eloszlás alak tényezője és jellemző élettartam-paramétere. További paraméter beiktatásával az eloszlás- illetve sűrűségfüggvények alakulása a valós adatok feldolgozásánál pontosíthatja azok kezdetének lefutását. Ez akkor célszerű, ha a tönkremenetek kezdete egy jellegzetes időponthoz (ciklusszámhoz) kapcsolható, vagyis a jellegzetes tönkremenetek kezdete nem esik egybe az üzembeállítással, és bevezetve „helyzetparamétert”, az új alak:

$$G(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{T_K}\right)^b} \quad \{17\}$$

a kiesési rátafüggvény ekkor:

$$\lambda(t) = \frac{b}{T_K} \left(\frac{t-\gamma}{T_K}\right)^{b-1} \quad \{18\}$$

Ilyenek lehetnek például egy készreszerelt elektromos berendezésen a telep első kimerülése és cseréje, amikor már megsérül a gyári vízhatlan tokozás, a bevonat lekopása az egyenletesen igénybevett felületről, az első karbantartó beavatkozás, amit például előírt időponthoz kötnék. Vagyis olyan események, amelyek időpontja a beépítési időhöz képest jól becsülhetően később következik be, és a tönkremenetek ciklusidejében meghatározó szerepe van, de nem tekinthető közvetlen oknak. [32]



32. ábra Példa az élettartam háló használatára [38]
(háromparaméteres Weibull- eloszlás)

4.2.2.3. Módosított elemzések Weibull eloszlású adatokra

Újszerű kutatási eredmények születnek a Weibull eloszlásnak a valós adatokra való pontosabb illesztésének módszereiről. Ennek célja, hogy az általánosítható törvényszerűséget követő adatok tapasztalati eloszlásfüggvényeit jobban követő elvi görbéket tudjanak rájuk illeszteni a pontosabb élettartam becslések céljából.

Egy ilyen megoldást (Weighted Combined Function Approach – WCF) fejtenek ki a BMW kutatásaiból idén publikált cikkekben, ahol az eloszlásfüggvény egy olyan sorozat összegeként adódik, ahol az egyes tagok a különböző jellegzetes hatásokkal terhelt időszakok hosszának ($n_1, n_2, n_3, \dots, n_r$) a teljes élettartamhoz viszonyított aránya szerint súlyozva számítják a kiesési valószínűséget. ([3], [70]) A cikkben ([70]) közölt összefüggés:

$$G_{WCF}(t) = \frac{n_1}{n} \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_{K1}}\right)^{b_1}} \right) + \frac{n_2}{n} \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_{K2}}\right)^{b_2}} \right) + \frac{n_3}{n} \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_{K3}}\right)^{b_3}} \right) + \frac{n_4}{n} \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_{K4}}\right)^{b_4}} \right)$$

{15}-ből származtatva

ahol az ismert jelölések számindexei az időszakok megkülönböztetésére szolgálnak. A módszer előnye, hogy az elhasználódási folyamat miatt eltérő működési tulajdonságokat mutató időszakokat képes elkülöníteni.

Egy másik, szintén a BMW-nél folyó kutatás szerint a „kettős exponenciális” Weibull eloszlás segít pontosabban illesztett eloszlásfüggvényt létrehozni a komplex részegységek élettartam adataira. [4] Eszerint a kiesési valószínűségről kapható eloszlásfüggvényt az

$$G(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad \text{a } \{17\} \text{ módosításával}$$

mint háromparaméteres Weibull eloszlásból levezethető alak képes leírni, ahol a t_0 a meghibásodás mentes időszakot jelzi. Ebből következően az eloszlásfüggvény alakja – a kitevőket és konstansokat rejtő jelölések eredeti ismertetése nélkül – kettős exponenciális jelleget vesz fel az alábbiak szerint:

$$G(t) = 1 - e^{-e^{\left(\tau - \alpha e^{\varphi \ln(t)}\right)}}$$

azaz egy képzett „ x ” változó bevezetésével $G(x) = 1 - e^{-e^{-x}}$

Ebben a szerzők az $x = \ln(t - t_0)$ helyettesítést alkalmazzák.

4.2.3. Egyedek normál eloszlású élettartam adatokkal

Normál eloszlás a legtöbbször akkor alakul ki, amikor a valószínűségi értékeket matematikailag „tisztá”, ok-okozatilag egyszerűen alakuló független részesemények sokasága befolyásolja. Továbbá ezen független tényezők hatásai csak kismértékben járulnak hozzá a kérdéses eseményhez, és a kismértékű hatások végül összegződnek. [64] A normál (Gauss) eloszlású változót két paraméter pontosan megadja: a várható érték vagy lokációs paraméter (μ), és a szórás vagy skálaparaméter (σ). Az ilyen eloszlású véletlenváltozó differenciálisan kis intervallumba (dx) esésének a valószínűségét a sűrűségfüggvény,

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \{19\}$$

míg annak a valószínűségét, hogy egy keresett értéknél (x_i) kisebb lesz, az előző integráltja, az eloszlásfüggvény írja le.

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad \{20\}$$

Ez utóbbi függvény értékei a kiesési valószínűséggel megegyezők.

Általában igaz, hogy pl. egy átlagos hiba számos hibakomponens összegeként, kumuláltan alakul ki. Tipikusan, például, egy bizonyos kísérlet végeredményének mérése során fel fog merülni analitikai, mintavételezési és folyamathiba. [23] A folyamathibákat a kísérleti körülmények beállításai, az alapanyagok változásai stb. okozhatják. Így a teljes hiba a sok hibakomponensnek (x_i) függvénye lesz. (Ezt neveztük később az egyes eloszlások konvolúciójának.) Ha minden egyes hiba meglehetősen kicsi, a teljes hibát, a körülmények egy bizonyos együttállásánál, a függetlenül eloszlott részhibák lineáris függvényeként lehetséges megbecsülni, az alábbi összefüggés szerint.[65]

$$x = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad \{21\}$$

ahol x a hibakomponensenként adódó valószínűségi változó, a_i az egyes (x_i) komponensek befolyásának a mértéke.

Esetünkben ezek viszont élettartam adatok, amit pl. a ciklikusan kialakuló terhelési-tehermentesítési események sokasága alakít ki, és mindegyik ciklus a maga statisztikai eloszlása szerinti terhelést ér el, majd a sok kis elhanyagolható mértékű károsodás összegződik, és okozza az egyed tönkremenetelét.

Ezt a természeti jelenséget a statisztikában a *centrális határeloszlás tétele* mondja ki, vagyis, hogy ha egy valószínűségi változó minél több, egyenként kicsi értéket felvevő (kis befolyást tevő), független valószínűségi változó összegeként alakul ki, akkor ez a változó egyre inkább normál eloszlásúnak tekinthető, ahogy a komponensek száma nő, szinte függetlenül az egyes komponensek eloszlásától. Fontos feltétel, hogy számos hibaforrásnak vagy véletlen torzító hatásnak lényegesen hozzá kell járulnia a teljes eltéréshez, de ne egyetlen hibaforrás domináljon a változó alakulásában. [32]

Matematikailag helytállóan ezt értsük úgy, hogy amennyiben az egyes befolyásoló hatásokra érhető valószínűségi változók ($x_1, x_2 \dots x_n$) eloszlásainak konvolúciójaként egy olyan eloszlássorozatra épül, mely nulla köré koncentrálódik, és adott (μ_0 centrális érték és σ szórás) paraméterpárra stabilizálódik, akkor az μ_0 várható értékű és σ szórású normál eloszláshoz tart. [66]

Három tény is indokolja a normál eloszlás fontosságát [65]:

- A centrális határ effektus, amely a több tényezőtől is befolyásolt valós hibaeloszlásoknak a normális jellegét sokszor okozza.
- A robusztussága vagy érzéketlensége, miszerint sok különböző statisztikai eloszlásnak az elméletitől való kisebb eltérése esetén is alkalmazható, vagyis az egyes eloszlások normalizálhatók, a normálissal közelíthetők.

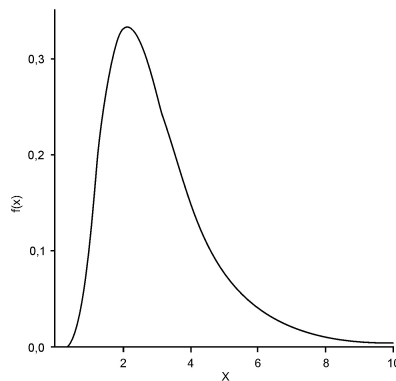
- Kissé torzult normál eloszlású változó esetén is alkalmazható közelítő valószínűségi becslésekre.

Miután az élettartam adatoknál sokszor számíthatunk ilyen eseménykörnyezetre, gyakran tapasztalható az élettartam, vagy az ahhoz kapcsolódó jellemzők normális eloszlása. A leggyakrabban a ciklikusan felfutó és lecsengő mértékű igénybevételi hatásoknak kitett, vagy folyamatos degradációt megélő, kopó, egyenletesen öregedő, magas hőmérsékleten üzemelő, forgás közben terhelt, vagy más módon halmozódó károsodást elszenvedő egyedeknél számíthatunk erre az eloszlásformára (csapágyak, ékszíjak, izzólámpák, csapágyak, pneumatikus elemek élettartam adatainak tipikus eloszlása).

4.2.4. A lognormális eloszlás megjelenése

Élettartam-problémákat tárgyaló irodalmi források szerint számos területen kialakuló élettartam jellemző lognormális eloszlást követ, amennyiben a befolyásoló tényezők „tisztán” alakítják a valószínűségi változó értékét. Miután a vegyi reakciók lefolyásának időtartamai, minták koncentrációjának alakulása jellegzetesen lognormális eloszlású, így a vegyi leépülés miatt bekövetkező tönkremenetek is nagyban meghatározhatják az élettartam adatok eloszlásának említett jellegét. Amennyiben a tönkremenetelt például alapvetően a korrózió (pl. fémtartály favastagságának csökkenése), vegyi öregedés (láncmolekulák depolimerizációja okozta szilárdság, rugalmasság, deformálhatóság csökkenés, vagy védőréteg kémiai elbomlása, de még az organikus szervezetek biológiai öregedése is) miatt, jön létre, viszonylag tiszta lognormális eloszlású élettartam adatok alakulnak ki. [7], [32]

Amennyiben a várható érték közel van a nullához, számottevő szórás mellett – ebből adódóan a CV nagy – az eloszlás kimutathatóan aszimmetrikussá válik, a sűrűségfüggvény a szimmetriatengelytől, míg az eloszlás görbe a középpértéket jelző inflexiós pontjához nézve egyaránt a pozitív irányba eltorzul. [59],[66] Az átlagnál kisebb értékek természetes sűrűsödése lényegesen kisebb tartományra korlátozódik, mint az átlagnál nagyobb értékeké.



33. ábra Egy lognormális eloszlású változó sűrűségfüggvénye[18]

Valójában nagyon sok normál eloszlásúnak feltételezett adatra igaz, hogy nem tekinthetjük normális eloszlásúnak a negatív értékek értelmezési tartományon kívül esése és alacsony, nullához közeli értékei miatt. [7] A tapasztalati sűrűségfüggvény torzulása, vagy a Gauss hálón való megjelenítésük is jelzi az adatok sűrűségviszonyainak nem normális jellegét. [10], Sokszor megállapítható a Weibull hálón történő felvételüknél is az elvi egyenestől való kisebb eltérés, elhajlás. [1]

Ezen esetekben az eloszlás kezelését megkönnyíti, ha egy olyan transzformációval élünk, amelyben valószínűségi változónak az eredeti változó logaritmusát tekintjük.

$$x_{tr} = \ln \xi \quad \{22\}$$

A transzformációt követően a velük való műveletek és ábrázolások, számítások a normális eloszlásnál megismert módon történnek, és szükség esetén az eredeti változóra való utaláskor a visszatranszformáláshoz az inverz műveletet kell elvégezni.

A lognormális sűrűség- és eloszlásfüggvénye:

$$f(x_{tr}) = \frac{1}{\sigma x_{tr} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x_{tr} - m)^2}{2\sigma^2}}, \text{ ha } x > 0 \quad \{23\}$$

$$F(x_{tr}) = \frac{1}{\sigma x_{tr} \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\ln x_{tr}} e^{-\frac{(\ln x_{tr} - m)^2}{2\sigma^2}} dx_{tr} \quad \{24\}$$

Az eloszlás várható értéke és varianciája:

$$M(\xi) = \mu = e^{m + \frac{\sigma^2}{2}}, \quad \{25\}$$

$$D^2(\xi) = e^{2m + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \quad \{26\}$$

ahol $m = M(\ln \xi)$ és $\sigma = D(\ln \xi)$, ebből következően

$$\xi = e^{n\xi} \quad \{27\}$$

Ezen eloszlástípus fontosságát jelzi, hogy a gyakorlati elemzésekben $b < 1$ alakparaméterű homogén Weibull eloszlásúnak tekintett változó, amelyet élettartam adatokból nyerünk, erős kapcsolatot mutat a lognormális eloszlással. Ez a kádgörbén azonosítható, korai kiesések szakaszában meghibásodó egyedekre mondható ki. [7], [15], [54]

Amennyiben más hatások is közrejátszanak az élettartam létrejöttében általános szabályszerűség, hogy a kevertséget is követni tudó, több paramétert is felhasználó eloszlások típusokat kell alkalmazni az elemzésekbe az eloszlásfüggvények jobb illeszkedése érdekében. (Pl. a korrózió mellett, ciklikus súrlódó, vagy hajlító igénybevétel, vagy a véletlenszerű túlterhelés mellett, a polimer öregedéséből adódó darabolódó molekuláris szerkezet.) Ebből következően az ideális körülményeket feltételező exponenciális, normális és lognormális eloszlások helyett célszerűbb és gyakorlatiasabb valamilyen Weibull eloszlással közelíteni az elemzéseinkben. [32], [3]

A kutatás tárgyát jelentő, öregedni képes polimer alapanyagú membránszűrők élettartamát a klór és más kémiaiilag aktív anyagok degradáló hatása mellett ciklikus mechanikai és termikus igénybevételek jellemzik. Ebből következően az elvi megfontolásaink mellett az iparági tapasztalatok is alátámasztják, hogy az élettartam elemzésekre optimális megoldás, ha a Weibull eloszlással közelítő modelleket alkalmazunk. [37], [50]

4.2.5. Az állományfüggvényekből becsült függvények és más mérőszámok

Az egyedek tönkremenetelét a működőképes mennyiséget mutató „állományfüggvényen” tudjuk elsőként nyomon követni. A működőképes állomány relatív gyakoriságának kifejezésével lényegében a túlélési valószínűség függvény becsült alakját kapjuk. Fontos, hogy az alábbi elemzési formáknál feltételezzük az ún. „kétállapotúságot” az egyed működésében. A

mellékletben található 15. táblázatban a jelentések, valamint a becslésből származó függvényalakok mellett megjelenítettük az exponenciális és a Weibull eloszlás szerint adódó függvényeket is.

Mint élettartam jellemző, a kiesési ráta függvénye mutatja a leginkább az egyedre vonatkozóan az adott igénybevételi környezetben való tönkremeneteli sajátosságait. Weibull eloszlásnál a sűrűség, az eloszlás és a rátafüggvények alakját egyaránt az alakparaméter értékei befolyásolják.[1]

Az élettartam az egyedek működési időinek vizsgálatával, és statisztikai elemzésén keresztül adható meg. A mérőszámok közt léteznek olyanok, amelyek a nem javítható, és vannak, amelyek a javítható termékeknél teszik lehetővé a számszerűsítést. Az előbbi általában a kisebb bonyolultságú, olcsó termékekre, valamint alkatrészekre és részegységekre, míg a második a több részegységből összeszerelt, valamint nagyobb értékű berendezésekre alkalmazhatóak. Erre mutat példákat a mellékletben található összegyűjtés (16. táblázat) a karbantartással is kapcsolatba hozható mérőszámokról.

4.3. Az élettartam vizsgálatok felosztása és általános menete

Az élettartam vizsgálatok az anyagvizsgálatok, technológiai próbák egy logikailag is problémásnak tekinthető területe, mivel a vizsgálat eredményét (élettartam) csak az élettartam végén ismerhetjük meg. Természetesen az elhasználódás mértékét, a tönkremeneteli határállapot kialakulásával összefüggő tapasztalatokat a működés folyamatos nyomon követésével megállapíthatjuk. A roncsolásmentes anyagvizsgálatok, és az erre alapuló diagnosztikai szolgáltatások széles köre szolgálja ezt a célt. [9], [13], [30], [60], [61]

Az általános felosztás szerint a vizsgálatok végezhetőek normál üzemi körülmények közt, egyfajta passzív kísérleti logika mentén, valamint tudatosan összeállított tervek szerinti – szabályozott terhelések és körülmények mellett – gyorsított tesztekkel, egy aktív kísérleti tér kialakításával.[9]

4.3.1. Valós idejű élettartam vizsgálatok

Ezen felosztás szerint normál élettartam vizsgálatnak tekinthető, amikor a termékegyedeket minden esetben a valóban előforduló terhelési és környezeti viszonyok közt üzemeltetik egészen a tönkremenetelig. Előnyei közül láthatunk néhányat az alábbi felsorolásban:

- Valóság-hű igénybevételi szintek,
- Az igénybevételekre jellemző természetes ingadozás (bár ez a vizsgálati eredmények megbízhatóságát mindig negatívan befolyásolja)
- Az igénybevételi hatások természetes változatossága és kombinációi
- Az igénybevételi és a környezeti hatások időbeli lefutásai is a valóságot tükrözik.
- Az egyedek terhelés miatti fáradása és tönkremenetele az életkor előrehaladásával mindig megegyezik a terhelés nélkül is bekövetkező öregedési folyamatok sebességével. (Pl. polimerek esetében a dinamikus lengő hatások okozta alakváltozás-kimerülés és az ezt okozó anyagszerkezeti átalakulással párhuzamosan zajlik a vegyi eredetű öregedés.)[16], [20], [26]

Az igénybevételi sajátosságok összegzését, a tervezett és a környezet miatt kialakuló terhelések mennyiségi és minőségi leírását szolgálja a kutatásban megalkotott és a későbbi fejezetekben

ismertetésre kerülő „igénybevételi arculat” kifejezés. E vizsgálatok különösen a termék életciklusához képest hosszúnak tekinthető élettartamú, és nagy innovációs nyomásnak kitett termékkörnél szinte lehetetlen megoldás, a túl hosszú vizsgálati idő és azok visszacsatolási lehetősége miatt. További hátránya, hogy a valós használati körülmények standardizálása (tényleges felhasználóknál üzemelő termékek nyomon követésével) irreális igény.

4.3.2. Gyorsított vizsgálatok

A gyorsított élettartam vizsgálat az egyedüli megoldás, ha a cél a minél pontosabban megállapítható, ráadásul minél hosszabbra tervezett élettartam, és a termékfejlesztésre való visszacsatolásnak a lehetősége. Iparági területenként eltérő tesztelési módszerek alakultak ki, szabványosított módszerek bevezetésével. E szigorúan szabályozott módszerek magukban foglalhatják a következő elemek egységesítését, esetleg szabványosítását: (pl.[45], [46])

- a terhelési szintek értékeit, a terhelésrávezetés módját,
- a terhelés időfüggvényeit,
- vizsgálati időtartamokat,
- a tönkremenetel tényének ismérveit és meghatározását
- igénybevételi sebességeket,
- a statikus és változó környezeti paramétereket, azok kombinációit és időfüggvényeit,
- kiértékeléseket stb.

A gyorsított vizsgálatok legfőbb előnye a mielőbbi, statisztikailag is megbízható élettartam adatok létrejötte. A szabályozott vizsgálati tér előnyeként tekinthető az egységesített viszonyok melletti megállapítások összevethetősége, de a kutatás rávilágít ugyanezen tény hátrányára is, vagyis a valós körülmények közt tönkremenő egyedeknél a „túl ideális” viszonyok miatti elhasználódási folyamat problémáira. [31]

A gyorsított vizsgálatok közös jellegzetessége valamely élettartamot meghatározó tényező (később „KO” tényező 7.5) fokozott szintje melletti vizsgálat elvégzése. Ezen általánosított lehetőségek a következők:

- **Megemelt igénybevételi gyakoriság**, amely időegységenként a valóságosnál nagyobb használati ciklusszámot jelent, előrehozva a tönkremeneteli időpontot. (pl. bútor és gépkocsiajtók, pneumatikus szerelvények nyitás-zárás ciklusai, vagy a szűrőmodulokat emelő-süllyesztő szerkezet ciklusai)
- **Megemelt igénybevételi sebesség**, amely a folyamatos működésű elemek tönkremeneteli idejét a naptári időhöz képest előrehozza. Problémát jelenthet, hogy a gyorsabb üzemelés a súrlódási munkából, és az egyéb el nem vezetett hulladékhőből adódóan növeli a szerkezet hőmérsékletét, nem várt módon tovább gyorsítva a tönkremenetelt. Ezen kívül a nagyobb működési sebesség nagyobb gyorsulásokat, nagyobb teljesítményű rezonanciát is okoz, szintén a korábbi tönkremenetelt generálva.

- **Megemelt terhelési szint** („burning”, HAST⁴, HASS⁵, RET⁶, ART⁷-tesztek) esetén is korábbra hozható a tönkremenetel. Kellően jó minőségű információkat kaphatunk, amennyiben ismertek az összefüggések a normál és a fokozott terhelési szint tönkremeneteli folyamata közt. (Wöhler-féle elemzési módszertan) Az elterjedt és esetenként szabványosított módszerek kidolgozták az eltorzult élettartam adatok visszatranszformálását a normál terhelési szintre vonatkoztatva. Problémát jelenthet viszont, hogy bizonyos terhelésfajták egy küszöbérték alatt nem okoznák a szerkezet elhasználódását, viszont felette káros folyamatok indulnak el.
- **Fokozott intenzitású környezeti hatás** mellett végzett gyorsított teszt esetén a károsító hatások mértékével érjük el a mielőbbi tönkremenetelt. (HALT⁸, MEOST⁹) A helyes megállapításokhoz itt is elengedhetetlen a tényleges élettartam és a gyorsított teszt eredménye közti konverzió, valamint a hatás és élettartam közti korreláció pontos ismerete. A készterméken folyó tesztek az élettartam adatok felderítésén kívül lényegében működés-megfelelési vizsgálatként is szolgálnak, amit a felhasználásra szánt termékek mindegyikén elvégeznek. Tipikus hatások az extrém nagy és kis hőmérséklet és azok különösen gyors váltakozása, emelt páratartalom, vibráció.

A gyorsított vizsgálatok megállapításainak sikere azon a konverzió múlik, hogy a fokozott szint mellett kapott tapasztalati eredmény hogyan korrelál a valóságos viszonyok közöttivel, valamint az, hogy a fokozott körülmény mennyire van szinergikus kapcsolatban más paraméterekkel. [31]

A dolgozatban szereplő szűrők estében a gyorsított (HALT és HASS) vizsgálatok esetén a környezeti hatás és a terméket érő terhelés néhol összemósodik, mivel a hőmérsékletnek a nyersvíz viszkozitásán keresztül terhelés-változtató hatása lehet.

A tesztek során az alábbi befolyásolható faktorok lehetségesek:

- **Közeg hőmérséklet.** A fent említett elektronikai területen elterjedt extrém hőmérsékletek itt nem a késztermék dermedt és „tüzes” állapotait jelentik, hanem a nyersvíz, mint üzemi közeg extrém magas (a gyakorlatban nem jellemző, pl. 50-60°C-os) hőmérsékletét, amiben a klór irreálisan gyors reakciósebességgel öregíti a membrán polimer anyagát.
- **Klór koncentráció.** Szintén a gyakorlattól távol álló klórkoncentráció mellett járatták a tesztelő szennyvíz közegében.
- **Nyomáskülönbségek.** Fokozott nyomáskülönbséget hoznak létre a szűrőüzemben és a visszamosás visszaáramoltatási nyomásai közt. Tehát az abszolút nyomáskülönbség és ciklikusan a nyomásváltozás amplitúdója is emelt szinten van.

⁴ HAST – Highly Accelerated Screening Test

⁵ HASS – Highly Accelerated Stress Screening

⁶ RET – Reliability Enhancement Test

⁷ ART – Accelerated Reliability Test

⁸ HALT – Highly Accelerated Life Test

⁹ MEOST – Multiple Environment Over Stress Test

- **Levegőztetési légáram.** A tisztító hatású, alulról felfelé áramló légbuborékok nem a csőmembrán palástjának terhelését befolyásolják, hanem a buborék által mozgatott szűrlet abrúziós hatását, valamint a csőmembránok befogási pontok közti lengését. Ez utóbbi a modulokba rögzítés helyén okoz ciklikus mechanikai fárasztó hatást, esetleg kiszakadást okozó dinamikus túlterhelést.
- **Visszamosási ciklusidők.** A lassan felépülő szűrőlepenyt a visszaáramoltatásokkal ciklikusan eltávolítják. Amennyiben ezt sűrűbben teszik, sűrűbben jelentkezik a rendszeren a hidrodinamikai lökésnek is nevezett káros – és előregedett szűrőknél végzetes terhelést okozó – jelenség.

5. Membránszűrők elhasználódása és az általános rutinvizsgálatok a funkció ellátására

5.1. Szennyvíztisztításra alkalmazott membránszűrők elhasználódása

A kutatás alapjául szolgáló szennyvíztisztító membránszűrők élettartam jellemzőinek tárgyalását megelőzően tisztázni kell a meghibásodási formákat, meghatározni a tönkremeneteli határállapot ismérveit. Az elhasználódási folyamat végét jelentő tönkremenetel bekövetkeztét alapvetően meghatározzák a vegyi eredetű terhelések (elsősorban a klór okozta), másrészt a szüntelen dinamikus lengő-lüktető hidraulikai nyomás, valamint a levegőztetés dinamikus hatása. Ezek általánosan az alábbi konkrét mechanizmusok szerint alakulnak ki:

- Membránszűrő pórusain ún. „mélységi eltömődést” szenvednek, ami itt azt jelenti, hogy a beléjük került szennyezőanyag-kolloidok a membrán felületi feszültségét megváltoztatják, így a fluxus fenntartásához szükséges nyomáskülönbségnek meg kell haladnia a megengedett mértéket. A további károsodások létrejötte előtt viszont a modult kivesszik a működésből. A szűrő paraméteres tönkremenetelt mutat és az előrehaladott állapotát a később ismertetésre kerülő „nyomáselhalási” teszttel lehet vizsgálni!
- Lyukadás jöhet létre a csőmembrán felületén a levegőztetés keltette abrázációs hatások, helyi elvékonyodás, vagy a membránfelület kis részére kiterjedő, működésből eredő sérülése miatt.
- Rosszul sikerült karbantartási beavatkozásból eredő szakadások, valamint későbbi mechanikai sérüléseket okozó anyagok üzem közbeni bekerülése. (Pl. túl erős vízsugárral való mosatás, vakolat vagy más szilikát bejutása a nyersvízbe, éles tárgyakkal való felsértés, stb.)
- A csőmembránokat befoglaló modulok csatlakozási pontjainál bekövetkező törés, szakadás, legtöbbször a túl nagy nyomású levegőztetés fárasztó hatására, amit a visszaáramoltatáskor megjelenő ellentétes erőhatások dinamikus váltakozása még fokoznak.

Mivel közegészségügyi szempontból a nyersvíz természetbe jutását kell elsőrendűen megakadályozni, ezért minden teszt és vizsgálat elsődleges célja, hogy a lyukadást és repedést felderítsék, hiszen ezeken a folytonossági hiányokon nem kívánatos frakciók tudnak átjutni, ami (pl.: vírusok és baktériumok) esetében tömeges megbetegedéseket okozhatnak. Vannak tisztító eljárások, amelyek a fordított ozmózis elvén még kisebb részecskéket hivatottak kiszűrni, pl. arzén ionokat, radioaktív atomokat. Ezeknél hasonlóan magas a meghibásodással járó kockázat, a közegészségügyi és társadalmi hatás.

Ipari vizek tisztításánál jelentős mennyiségű nyersanyag és bele fektetett energia, az előkészítő berendezések használatának CO₂ egyenértéke semmisül meg, ha a szűrőmodul meghibásodása miatt a permeátumot, vagy rosszabb esetben a készterméket kell kidobni. Vagyis a meghibásodással járó kockázat a direkt és indirekt folyamatokból származó veszteségek és környezeti terhelés miatt lehet jelentős.[10]

Amennyiben csak a szűrőmembránok kisebb meghibásodása miatt folyamatleállással kell számolni (közegészségügyi hatás nélkül), akkor is jelentős társadalmi hatása lehet a műszaki eseménynek, hiszen az érintett település ivóvíz ellátása kerül átmenetileg veszélybe.

5.2. Az élettartamot meghatározó paraméterek a víztisztító membránszűrőknél

Az említett membránszűrők élettartama általánosan függ a normál használat közbeni ciklikus hatásoktól, valamint a karbantartási műveletektől. Azonban a felhasznált anyagok agresszív közegekben mutatkozó természetes öregedése is jellemző.

Kutatásunk egyik önálló eleme a szűrők öregedését létrehozó igénybevételi formák besorolása aszerint, hogy statikusnak feltételezett közegben is kifejtjenék-e káros hatásukat, és öregítenék-e a szűrők membráncsőveit, vagy csak a dinamikus hatások képesek erre a felsorolt igénybevételi formákban.

A víztisztításban a membránszűrők tönkremenetelét viszonylag kevés paraméter leromlása jelzi. Az alább felsorolásra kerülő hatások a legtöbb esetben két problémás hibajelenséget váltanak ki:

- A szűrő külső felületén a szűrlet felhalmozódásakor, vagy a pórusok eltömődésével a szűrési hatékonyság leromlik, és a kívánt anyagáram nem jön létre.
- Amikor a nyersvíz a szűrőn való áthaladás nélkül (akár kis mennyiségben is) a permeátumba jut, bomlik a szűrő anyagának szerkezeti integritása, vagy a nyersvízbe merülő szerkezeti elemek valamelyikén „tömítetlenség” alakul ki,.

Az előző fejezetekben ismertetett terminológiánk szerint az első egy *paraméteres tönkremenetel* eredménye, hiszen egy természetes, számszerű paraméterrel egyértelműen kísérhető folyamatnak tekinthetjük. A szűrlet eltávolítására – és így a paraméter helyreállítására – ráadásul ciklikus visszamosási fázisok szolgálnak. A második tönkremeneteli forma hirtelen, *egységugrás-szerű funkcióvesztés*, a legtöbbször sérülés eredménye. Míg az eltömődés formáit az anyagáram mértékéből, valamint az áramlás közbeni nyomásviszonyok alakulásából következtethetjük ki, addig az utóbbit egy célzott vizsgálat derítheti ki a statikus ellennyomás alá helyezett szűrőrendszer nyomáseséséből.

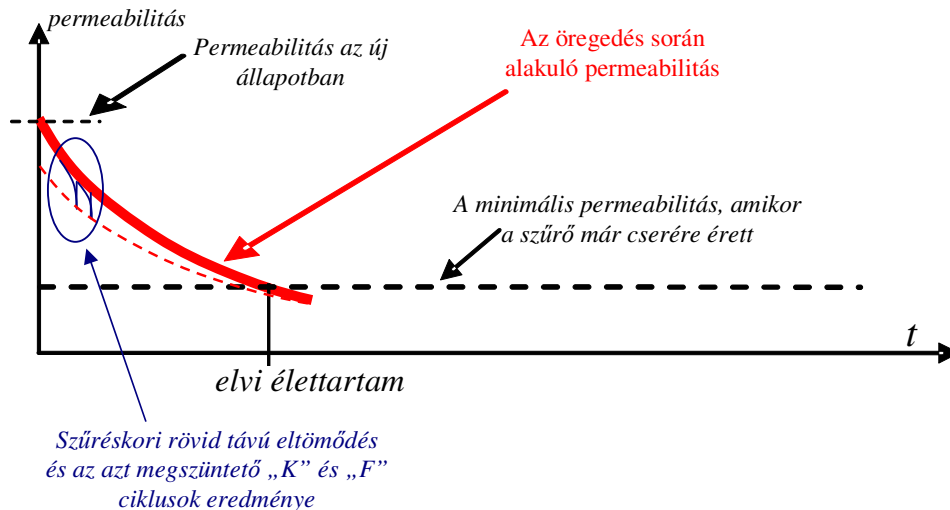
5.2.1. A fluxus

A vizsgált szűrőrendszerek élettartamát kísérő egyik legjelentősebb – és korábban is használt – paraméter a szűrőkön áthaladó, időegységre eső folyadékáram, a fluxus (φ).

$$\varphi = \frac{Q}{t \cdot A} \left[\frac{m^3}{h \cdot m^2}; \frac{m}{h} \right], \quad \{29\}$$

ahol $\frac{Q}{t}$ az anyagáram és „A” a szűrőfelület

A fluxus azonos nyomásviszonyok mellett, természetes módon is csökkenést mutat a ciklikus visszamosás ellenére kialakuló mélységi eltömődés miatt. A fluxus nem kimondottan a szűrő működésétől függő passzív paraméter, hanem a permeátum negatív nyomásán keresztül szabályozható. A mélységi eltömődés előrehaladtával azonban adott fluxus fenntartása a szűrőre túlzott terhelést jelent, így az élettartamot meghatározó tényező lesz. Ebből következően a maximálisan megengedhető átlagfluxus egy kortól függő üzemeltetési paraméter lesz. Ezt átlépni maximum 20-30%-ban ritkán, rövid időtartamokra, vészhelyzet elhárítási okokból megengedhető, de alapvetően kerülendő.



34. ábra A szűrő permeabilitásának változása a használati idővel

A fluxus ismerete azonban még nem elegendő a működés alatt elszenvedett igénybevételek összegzéséhez és a hátralevő élettartam pontos becsléséhez.

5.2.2. Statikus öregítő hatások a szűrők élettartamára

A következőkben statikusnak nevezzük azon tényezőket, amelyek jelentősebb időbeli változás nélkül egy áramlásmentes közegben állva is kifejtik hatásukat, míg dinamikusan a rövidebb-hosszabb időciklusokkal periodikusan jelentkező hidrosztatikai, mechanikai és vegyi öregítő tényezőket soroljuk fel. A hatások nyomon követéséhez és az öregedésre gyakorolt hatásának elemzéséhez elengedhetetlenek ezek számszerű értékeinek ismerete.

3. táblázat A statikus öregítő hatások membránszűrőknél

öregítő hatás és a	figyelt fizikai mennyiség	mérhető vagy kalkulált értéke
A folyadékáram okozta statikus mechanikai hatások	folyadékáram	áramlási sebesség [dm ³ /h]
A hőmérséklet hatása	hőmérséklet	A nyersvíz közeg hőmérséklete [°C]
Az eltömődés mértékének hatása	nyomáskülönbség	Közvetetten a nyersvíz és a permeátum oldali közeg azonos hidrosztatikai magasságokon mért nyomásának különbsége [Pa]
A nyersvíz lebegőanyag-tartalma	fajlagos anyagtartalom	Tapasztalati értékek szerint [mg/dm ³]
Az ozonizálás hatása	fajlagos anyagtartalom	Az adagolt ózon mennyisége [µg/dm ³]
A klórozás hatása	fajlagos anyagtartalom	Az adagolt klór mennyisége [µg/dm ³]
A víz viszkozitásának hatása	dinamikai viszkozitás	A nyersvíz-közeg hőmérséklete alapján és tapasztalati értékekből a kalkulált dinamikai viszkozitása [Pas]

A következőkben ezen tényezők élettartamot csökkentő káros hatásainak áttekintése látható.

A folyadékáram okozta statikus mechanikai hatások

A membráncsövek mentén felfelé haladó levegőbuborékok a felületről a szűrlet eltávolításakor nyírással veszik igénybe a részben a pórusokba hatoló anyagot, ami a pórusok kimeneti nyílásainak terhelésével jár, valamint kemény szűrletfrakció esetén erodáló hatást is kifejt a súrlódás révén.

Ezen kívül az élőiszapban lebegő szemcsék, a vízkezelésben adagolt PAC¹⁰, vagy pl. a felszíni vizek bemosott hordaléka addig le nem ülepedett kisebb szemcséinek koptató hatása már stacioner áramlásnál is koptató hatással járna, azonban a dinamikus ható hidraulikus lengések jelentősen felerősítik ezt az igénybevételt.

A hőmérséklet hatása

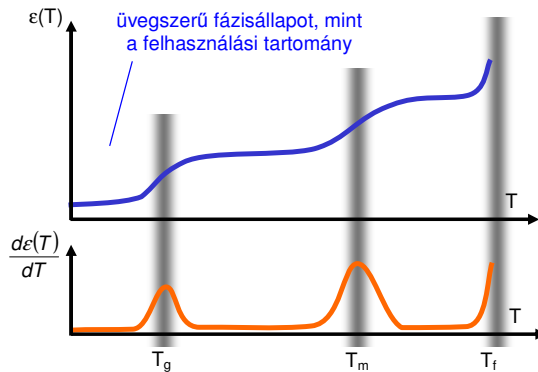
Akár a membrán, akár egyes típusoknál a textilstruktúrájú hordozó anyaga egyaránt érzékeny a hőmérsékletre. Különösen nyári időszakban, trópusi országokban alkalmazva a szűrendő közeg hőmérséklete elérheti és túllépheti a 30-40°C-ot. Ez bizonyos reakciók sebességét a „normális” (15-25°C) üzemi viszonyokhoz képest megközelítőleg megduplázza. A termodegradáció jelensége során a használati évek múltával a polimerek láncmolekuláinak darabolódásával számolhatunk, ami csökkenő szilárdságot, törekenységként mutakozó rugalmassági modulus csökkenést eredményez, akár a vegyi környezettől függetlenül is. Az ilyen jellegű szilárdságcsökkenés a dinamikus hatások elviselő képességét rontja, különösen a nyomás elviselésére tervezett textil, vagy PU hordozójú csőmembránoknál. [35]

A molekulaláncok darabolódását a termikus okok mellett a vegyi eredetű öregedéssel is gyorsítja, így a káros hatások kumulálódhatnak is. Ennek oka a nyersvízben eredendően levő vegyszerek, valamint a tisztítási fázisok alkalmával bevitt klór. [35]

A vegyszerekkel is szennyezett környezetben az előzőek mellett figyelembe kell venni a polimerek azon tulajdonságát, hogy a tartós mechanikai feszültség hatására kúszási jelenségeket mutatnak, azaz lassan kialakuló alakváltozásra számíthatunk. Például a szűrési nyomás miatt a kéttengelyű nyúlásra igénybevett, és ezért kitáguló hengerpalást, valamint a membrán szűrési paraméterei kissé megváltozhatnak a „normál” hőmérsékletre beállítottához képest. Bár a szűrők anyagai az alkalmazott polimerek üvegesedési hőmérséklete alatt használatosak, viszont extrém magas használati hőmérsékletnél közelítheti azt. A statikus terhelésre mutatott tartósfolyás mértéke viszont magasabb hőmérsékleten még T_g alatt is valamelyest nagyobb. [26], [22], [35]

A T_g alatti alkalmazás azért fontos, mivel a nyomásviszonyok miatti, pólusméret változást okozó tartósfolyás nem megengedhető. Egy ilyen deformáció akár kisebb területen, lokális sérüléseknél is egészségügyileg problémát okozhat, hiszen nagy reprodukciós sebességű vírusok juthatnak ki a későbbi ivóvízbe, ami kis mennyiségben sem engedhető meg.

¹⁰ PAC – poralakú aktív szén adalék, amely adszorpción keresztül a felületén (~1000 m²/g) köti meg a szennyeződések.



35. ábra Nagymolekulás, kristályos részeket is tartalmazó polimerek elvi termomechanikai görbéi a változatlan terhelés alatti kúszásról és a kialakuló deformációs sebességéről

Mivel a szűrők tartós használatakor kb. 96-99% -időarányban a szűrő, mint képzeletbeli cső szerkezetén belül negatív nyomás hat, ezért a fent leírt „tágító-kúszás” hatása nem jellemző, az ellenkező irányú kúszást, pedig a hengeres alak és a nyomás ciklikus előjelváltása jelentéktelenné teszi.

Az eltömődés

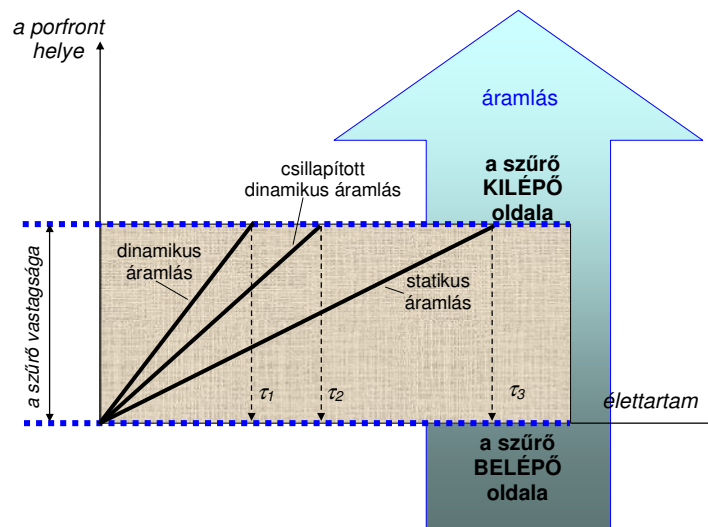
A szűrés lényegében egy olyan szeparáció, amelynél a folyadékáram útjába helyezett szűrő visszatartja a membrán pórusméreténél nagyobb szuszpendált szemcséket, nagyméretű szerves molekulákat és egyéb vegyületeket, vagy a szándékosan létrehozott koagulátumot¹¹, stb. Nano- és fordított ozmózis elvű szűréseknél már az oldott anyag molekuláit is képes visszatartani, úgymint: íz- és szagvegyületek, peszticidek, oldószer-molekulák, a biológiai lebontást is túlélő mikroorganizmusok stb.

A nyersvíz lebegőanyag-tartalmától függően néhányszor tíz perc is elegendő lenne a szűrő eltömődéséhez a kialakuló szűrőlepeny miatt, viszont ez még egy egyszerű tisztítással visszafordítható folyamat. Ez a ciklikus tisztítás növeli meg hónapokra a szűrők alkalmazhatóságának idejét karbantartási eljárások nélkül is. A tartós használattal azonban különösen a kisebb részecskék okoznak a szűrőnek öregítő hatást, hiszen a pórusokba egyre beljebb hatoló szennyező részecskék mélységi eltömődést hoznak létre. [35]

A felületi szűrésnél a beékelődésük során az adott póruson további áramlás nem lehetséges, így a szűrő működő felülete lecsökken. Elmondható továbbá, hogy az eltömődött pórus közelében megváltozó áramlási viszonyok segítik a nyersvíz oldalon a szennyeződések torlódását, és egyre nehezítik a sikeres visszamosást. [35]

Gázok szűrésénél értelmezik az ún. „porfront” pozícióját és vándorlását. Ez a már mélységi eltömődést alkotó, legmélyebbre hatolt szemcsék képzeletbeli burkolófelületét jelenti, amelyet tisztítással nem lehet eltávolítani. Statikus gázáramnál kisebb, míg dinamikusnál nagyobb a porfront kilépő oldal felé mutató haladási sebessége. Dinamikus alatt az áramlási sebesség és néha az áramlási irány gyors időbeli változását, lengését értjük, mint például dugattyús kompresszorok vagy belsőégésű motorok légárama esetén. [42]

¹¹ A koagulátum a vízkezelés során külső kemikáliák alkalmazásával létrehozott (kicsapatott) kolloid fázis, amely a szennyező anyagokat tartalmazza. Miután fizikai jellemzői a tisztítandó víz-fázistól eltrér, könnyen szeparálható



36. ábra A porfront vándorlása a szűrő vastagsága mentén, porszűrő élettartamának előrehaladtával

Ez a probléma a csőmembránokkal való folyadékszűrésnél kevésbé lényeges, mivel elhanyagolható a kialakuló szűrőlepeny, és a negatív nyomásgradiens és egyéb hatások miatt a szűrőfelület valószínű csökkenése nem következik be. Belső szívó hatásnak kitett, üreges szűrőkkel a folyamat egyébként sem lenne fenntartható, csak kb. 1 bar nyomásesésig. Ezen kívül a részecskék rostról rostra való könnyű vándorlását a folyadék belső molekuláris összetartó ereje akadályozza. [33]

Membránszűrőknél a problémát a mélységi eltömődés egy másik formája jelenti. A pórusokba kerülő lebegő szennyeződés nem csak az átszívási veszteség átmeneti növekedését okozza, ami a nagyobb szennyező részecskénél jellemző. A kisebb kolloidális részecskék képesek másodrendű kötésekkel is a belső felülethez kötődni, ami megváltoztatja a pórus hidrofilitását, és így az eredeti felületi feszültségből adódó permeabilitást. A szűrő átadásási képességének változását egy korábbi ábra (34. ábra) jelleggörbéjén követhetjük nyomon.

A nyersvíz lebegőanyag tartalma

Az eltömődést gyorsítja a tisztítási hatékonyság érdekében alkalmazott ozonizálás és a por alakú aktív szén (PAC) adagolása is, mivel a – reakciótermékként létrejött, vagy magához kémiaiilag kötött – szennyeződésekkel koagulátumot képez.

Egy másik fontos tény, hogy ugyanazon méretű szemcse ülepedési sebessége a nagyobb viszkozitás miatt télen kb. harmada a nyárinak. Azonos berendezés, szennyvíz összetétel és üzemi körülmények esetén a nyári időszakban kiülepedhető kicsiny pelyhek egy része a téli viszkozitás-növekedés miatt így nem ülepedhető, és az ülepedésként a tisztított vízzel távozik. Részecske vagy pelyhely átmérőnél ez azt jelenti, hogy a még visszatartott részecskék átmérőjének alsó határa 22%-kal növekedik. [28] A viszkozitás változásának a jelensége értelemszerűen a hideg, illetve nagy hőingadozást mutató mérsékelt égővi országokban nagyobb problémát okoz. [77]

A kezelt víz egyik fontos minőségi paramétere lesz a kezelést követően megmaradó, optikailag észlelhető zavarosság, másként „turbiditás”.

Az ozonizálás hatása

Az ózon színtelen, jellegzetes szagú, háromatomos oxigéngáz, erős oxidáló hatása révén a szerves vegyületeket gyorsan megtámadja, így az élő szervezetekre erős mérget jelent. A levegőben instabil, mivel háromnapos felezési idővel, endoterm folyamatban könnyen bomlik, viszont a kémiai aktivitásából következően a tisztítandó vízben a káros mikroorganizmusokra nézve tisztító hatású. [29]

Az O₃ az atomos oxigénnél ugyan kissé gyengébb oxidálószer, azonban másfélszer jobban oldódik a vízben, így oxidatív hatékonysága tekintetében jobb. [65]. Erős oxidáló hatásával a tovább bontható szervesanyag-mennyiséget csökkenti, így a víz biológiai tisztulását segíti. Aktív szénrel a nemkívánatos szín-, íz- és szaganyagok hatékonyan adszorbeálhatók. Mindkét eljárásnál a létrejövő képlet a mélységi eltömődést segíti. Az ultraszűrést ezért lehetséges mikroszűréssel kombinálni az ultraszűrésre káros koagulátum előszűrésére.[47]

A klórozás hatása

Bizonyos technológiákban alkalmaznak a mikroorganizmusok pusztítását és az idegen íz- és szaganyagok vegyületeinek eltávolítását segítő adalékot, a nátrium-hypokloritot. Ez a koaguláción keresztül is elérheti a hatását. Alkalmazása azonban bizonyos tekintetben káros, hidraulikai rendszerre tett hatása az előzőben említettekéhez hasonló hatást vált ki, vagyis gyorsítja a szűrőlepleny kialakulását, nehezítve ezzel az áramlást. [47]

A biológiai lebontással és csőmembránokkal végzett vízkezeléseknél a klórozás leginkább csak az oxidatív hatása miatt kerül alkalmazásra, alkalmasszerűen, viszonylag ritka öregítési ciklusokat okozva. Ekkor nem kell számolni a direkt koaguláció miatt kialakuló szűrőlepleny közvetett öregítő hatásával. Azonban számolni kell a klór polimerre gyakorolt közvetlen vegyi hatásával, mivel a molekulák szubsztituenseihez kapcsolódva azok szerkezetét módosítja, valamint erős oxidáló hatásával a láncokat is képes darabolni. A normál üzembeli (tehát nem karbantartási) alkalmazás káros hatása azonban nem csak az igen hosszú élettartamú, hanem a korábban tönkremenő egyedeknél is már kimutatható. Mikrobiológiailag erősen szennyezett és jelentősebb biológiai eltömődésre hajlamos, gyakori membrántisztítást igénylő technológiai térben viszont releváns, élettartamot befolyásoló tényezővé válhat.

Miután az ilyen esetek a nagyobb mikrobiológiai aktivitású melegebb éghajlatú ázsiai országokban gyakoribbak, óhatatlanul fellép a magasabb káros hőmérséklet, a járulékosan megjelenő nagyobb kiszűrendő közeg, és az ezt ellensúlyozandó nagyobb klórmennyiség károsan kumulálódó hatása is. Kijelenthetjük, hogy melegebb éghajlatú földrajzi közegben üzemeltetett szűrők várható élettartama alacsonyabb.

A szennyvízhez ellenben a biológiai lebontásra erősen építő technológiában nem célszerű a klóros kezelést alkalmazni a szűrők előtti technológiai lépésekben, mert az a lebontást végző baktérium tenyészetnek erős mérgező lenne, rontva ezzel a tisztítási hatékonyságot. Az elfolyó ágon alkalmazott klór pedig környezetvédelmi aggályokat vet fel. A később a szűrletbe, azaz az ivóvízbe jutó anyagáram klórozása pedig idegen íz és szaganyagokat okozna, így ott sem jellemző.

A víz viszkozitásának hatása

Az ultraszűrő pórusméretének tartományában az alkalmazandó nyomásviszonyokat és az azok fenntartására hozott technológiai intézkedéseket befolyásolja a vizes közeg áramlását kísérő belső nyírószilárdság alakulása. A közeg viszkozitása a Hagen Poiseuille egyenlet szerint egyrészt megváltoztatja a csőmembrán belsejében a folyadékhozamot, másrészt a pórusokon

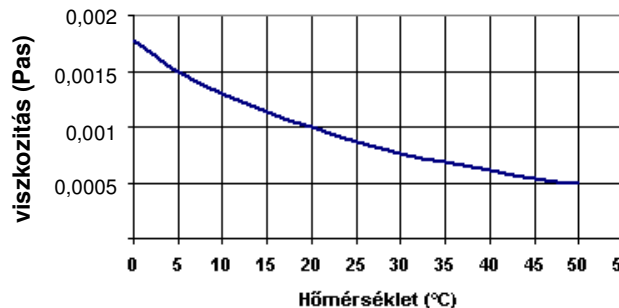
való áramlásban hasonló mechanizmusok miatt a membrán permeabilitását, azaz a térfogatáram/nyomáskülönbség arányt az alábbiakból kiindulva.

$$q = \frac{V}{t} = \frac{\Delta p \cdot \pi}{8 \cdot \eta \cdot L} \cdot R \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad \{30\}$$

A „tisztá” víz áramlás közben a viszkozitása folytán jelentős nyomást gyakorol az „L” hosszúságú és „R” sugarú csőmembrán palástjára, és ezen belül a membrán pórusaira. Az igénybevételt erősíti a nyomásváltozásokkal létrehozott váltakozó áramlási irány. Az oldott összetevőket és más lebegő anyagokat is tartalmazó víz viszkozitása számottevően meghaladhatja a tisztavízét, ezért a csőmembránok hidraulikus terhelését – és így közvetve az élettartamát – befolyásoló tényező lesz.

Különösen a téli időszakban, valamint az északi országokban üzemelő létesítményeknél kell élettartamot meghatározó tényezőként kezelni. Hazai körülmények között a kisebb szennyvíztisztító telepeken a szennyvíz hőmérséklete szélső eseteket nem véve figyelembe általában 8-24°C között ingadozik a téli-nyári időszakban. [28] Belátható, hogy nemzetközi léptékben a szűrőmembránok működési hőtartománya 2-40°C is lehet. Ebből következően a déli országok meleg, és az északiak hideg téli időszakaiban működő közegek viszkozitási tényezői közti különbség akár háromszoros is lehet, amit a területekre jellemző oldott anyag és lebegő részecske tartalom tovább fokozhat.

Összegzésül elmondható, hogy a kisebb hőmérséklet előnye az előző fejezetben taglalt tényezők hatás-együttesének mérséklődése, és így a vélhetően kisebb öregítő hatás. Mindezekkel viszont ellentétes lesz a viszkozitás növekedése miatti terhelésnövekedés, és ennek köszönhetően az élettartam csökkenés.



37. ábra A víz dinamikai viszkozitásának változása a hőmérséklet függvényében [28]

Kutatások szerint a víz viszkozitása a fenti diagram szerint változhat valós alkalmazási körülmények, tehát szennyezettség mellett.

5.2.3. Dinamikus öregítő hatások a szűrők élettartamára

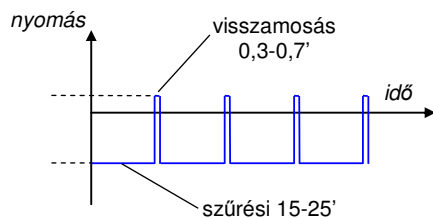
A következőkben *dinamikusnak* nevezett öregítő hatásnak tehát a rövidebb-hosszabb időciklusokkal, periodikusan jelentkező hidrosztatikai, mechanikai és vegyi igénybevételi tényezőket soroljuk fel, amelyek az élettartama során üzemeltetés vagy karbantartás során érik a szerkezetet.

A folyadékáram okozta dinamikus mechanikai hatások

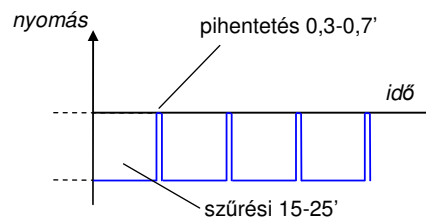
A membráncsövek mentén a ciklusos áramlási utakat bejáró, kemény és nagy szilárdságú szűrlet frakciók kifejezett koptató¹² igénybevétellel terhelik a felületet és a pórusok kimeneti részeinek tájékát, valamint a váltakozó hidrodinamikai igénybevétel a mikroszerkezet fáradásához is vezethet. Ezeket az anyagokat már a statikus hatásoknál is megemlítettük, mint a felszíni vizekkel behordott hordalék kisebb szemcséi, az élőiszapban lebegő szerves részecskék vagy a vízkezeléshez adagolt PAC, esetleg a vizes közegben helyileg kialakuló kalcium-oxid részecskék stb.

A visszamosás, mint mechanikus fárasztási ciklusok és hatása

A folyamatos működtetéskor a szűrőlepeny kialakulását tehát ciklikus visszamosással lehet megelőzni. Ennek eredménye az, hogy a szűrő anyagára a csőmembránt összenyomó és a pórusokat kívülről befelé igénybevevő erők időnként irányt váltanak, ellenkező értelmű feszültségeket létrehozva a szerkezetben (38. ábra, 39. ábra,). Tipikus lengő-fárasztó terhelést kell tehát elviselni a csőmembránoknak és az őket befogadó modul-foglalatoknak egyaránt. Ez utóbbi azért lehet kritikus, mert a ragasztott kötésnél a foglalatban még nem, viszont a csőmembrán szabad részén a foglalat közvetlen közelében már jelentkezik a pulzáló hatás.



38. ábra A szűrés – tisztítás ciklusok nyomásviszonyai visszaáramlattal



39. ábra A szűrés – tisztítás ciklusok nyomásviszonyai pihentetéssel

A levegőztetés mechanikai hatása

Az ivóvíz és általában a szennyvízkezelésnél a levegőztetés a szűrési–visszamosási ciklusok kísérő hatásaként a modulok aljáról néhány milliméter átmérőjű furatokon bevezetett levegőbuborékokkal történik. A két funkció független egymástól, de általában a levegőztetés folytonos, míg ivóvízkezelésnél a visszamosás alatt intenzívebb lehet. Vagyis szűrési, visszamosási és pihentetési (áramlásmentes) fázisban is alkalmazzák a szűrlet eltávolítására, a pórusok tisztántartására. A levegőbuborékok a csőmembránok tömege közt igyekeznek a felszínre, miközben a csövek felületén végighaladva feldarabolják a kialakuló szűrőlepenyt. A buborékok tömegeinek gyors feláramlása rázó hatást is kifejt, elősegítve ezzel a kitisztulást. A membránok felületén az eltömődő határretegben a feláramló buborék nyíró hatást is kifejt, így csökkenti a koncentráció-polarizációt, majd a csőmembránok mozgatásával a durva szennyezések leválását és a membrántömegből való eltávolítását segíti. A levegőztetés ezen formája tehát nevezhető mikro- és makrofunkciónak egyaránt. Miután az említett nyíró hatás ciklikusan következik be, szintén anyagfáradást eredményezhet a szűrő felületén.

A buborékoltatás közben kialakuló rázás okozza azonban a következő káros mechanikai hatást. A lengő csapkodó csőmembránok felülete ilyenkor erősen súrlódhat egymáson, valamint a

¹² Korábban ld.: eróziós kopás.

foglalatok környékén jelentős, rezgésként jelentkező húzófeszültség növekedéssel veszi igénybe a szerkezetet. Tönkremeneteli okokként tartják számon a foglalatokból a fáradásos „kitépődés” miatti és más szerkezeti hibákat.

A dinamikus hatások közt kell azonban ismét megemlítenünk az eróziós koptató hatást, amely ciklikusan jelentkezve a pórusok bemeneti nyílásánál az anyag kifáradást okozhatja.

A klóros karbantartások és hatásai

A klór jótékony hatással van a rendszerre, amennyiben a felszaporodott nemkívánatos szerves, és főleg mikrobiális szennyeződést kell eltávolítani. Ekkor a szennyeződés fellazításával egyrészt fizikailag segíti annak eltávolíthatóságát, másrészt erős oxidatív jellege miatt hatástalanítja a nagymolekulás szennyeződéseket azok lebontásával.

Viszont hasonló okokra visszavevethetően a szűrők anyagára is hasonló károsítást képes jelenteni: vagy a membránok alapanyagaira, vagy a szűrőszövetek hordozó anyagaira komoly szilárdságrontó és a pórusméretet befolyásoló hatást gyakorol. A klór a technológiában több alkalommal is megjelenhet a detergens tulajdonságai miatt:

- Ivóvíz előállításánál
- Esetlegesen ipari felhasználás előtt
- Karbantartási ciklusok során
- Felújító ciklusok során.

A klór élettartamot befolyásoló hatásairól egy későbbi fejezetben térünk ki, ahol a hatás jelentőségére és körülményeire, valamint az egész élettartamon keresztüli károsító hatásának számszerűsítésére modellt is kidolgoztunk.

5.3. Vizsgálati formák és azok kategorizálása

5.3.1. Megközelítések a vizsgálatok besorolására (in-, on-, és off-line mérések)

Miután a vizsgálat tárgyát egy lineáris anyagáramlást kezelő, frakciókat elkülönítő, divergens folyamat képezi, a vizsgálatok definiálását és tárgyalását mind folyamatirányítási, mind vizsgálat-módszertani szempontból egyaránt meg kell tennünk.

A folyamatirányítást lehetővé tevő mérés technikában három elkülöníthető csoport van, amelyek a mintavételt, mintakezelést, vizsgálati módot és vizsgálati sebességet, és legfőbbsképpen a visszacsatolás gyorsaságát egyaránt meghatározzák. [56]

- Az *in-line* méréseknél, üzem közben, a folyamat és az anyagáram megszakítása nélkül szereznek információkat a folyamatba integrált műszerekkel. A mért adatokat teljes egészében valós üzemviszonyok mellett szerzik. A visszacsatolás csak a jelfolyam műszakilag indokolt késedelmével (gyakorlatilag azonnal), az ellenőrzőjel közvetlen felhasználásával történhet. [18], [58] Valójában az üzemi körülmények jeleit, beállítási paramétereit ismerhetjük meg ilyen módon a víztisztító kazettáknál, mint pl.: hőmérséklet, nyomásviszonyok, fluxus, klór és más anyagok koncentrációja, ciklusidők, leállítási és indítási időpontok, ...
- Az *on-line* megoldásnál mérés technikai értelemben a vizsgált anyag a folyamatból, vagy üzemelési közegből nincs kiemelve, de azt megszakítva végzik a méréseket. Más megközelítés szerint a folyamathoz csatolt műszer az anyagáram haladása közben

szakaszosan veszi (emeli ki) a mintát, de a fő anyagáramtól elkülönítve végzi a kiértékelést. A valós üzemi körülményektől kissé különböző mérési eredmény születhet ezzel a megoldással. A visszacsatolás sebessége a mérési szakaszok frekvenciájától és a kiértékelés vizsgálati idejétől függ. [18], [11] Membránszűrési technológiában ez azokra a vizsgálatokra azonosítható, amelyet a szűrési folyamat megállításakor, de a nyersvíz közegből nem kiszertelt kazettákon végeznek, mint például nyomáselhalási tesztek. Vagyis azonnali adatnyerés mellett nyomás és koncentrációadatokat, valamint ciklusidőket lehet felderíteni.

- Az *off-line* vizsgálatoknál a mintát kiemelik a folyamatból, és labor- vagy műhelykörülmények közt vizsgálják. Viszonyait tekintve hasonló kategória, ha a vizsgálatok a folyamat leállításával kell, hogy járjanak (pl.: karbantartási diagnosztika, ahol a gépelemet le kell üríteni, kiszerezni, ...). A visszacsatolás sebességét a műszakilag indokolt mellett mintavételezési, szállítási, kiértékelési és szervezési sajátosságok is meghatározzák. [18], [58] Membránszűrésnél ez az előző módszerrel (*on-line*) problémásnak látott kazetták kiszerezését, és laborban való további vizsgálatát jelentik.
- *Úgynevezett öregítő* vizsgálatokat is végeznek olyan egyedeken, amelyek a víztisztítóban soha nem jártak, egész életüket a laborbeli próbaberendezésben töltik. Ezeket a gyári laborban, a valós működési paramétereket és ún. öregítő hatásokat modellezve, de annál nagyobb intenzitással előidézve, gyorsított vizsgálatként teszik tönkre. Az itt szerzett élettartam adatokat, tönkremeneteli károsodásokat próbálják összevetni a valós körülmények közt üzemelő kazettákban levőkkel.[7], [2]

5.3.2. Az *in-, on-, off-line* vizsgálatok a szűrési folyamat során

A víztisztítást csőmembránokkal megvalósító ultraszűrő technológiában alkalmazott állapotfelmérő módszerek az előző fogalomrendszerbe helyezve konkrétan az alábbi módokon jönnek létre. [2]

- A gyártás végső ellenőrzéseként a modulok (és a kazetták) megfelelőségét a tömítetlenség szempontjából ellenőrzik, ún. „nyomáselhalási” tesztekkel, biztosítva ezzel a hibamentes kezdő állapotot.
- A gyártás helyén, üzemi területen még nem járt, gyártási tételekből kivett berendezéseket vagy annak elemeit gyorsított vizsgálatoknak (ún.: öregítésnek) vetik alá. Gyorsított vizsgálat esetében a valós viszonyok modellezésén keresztül, az igénybevételi ciklusok frekvenciájának vagy a használat sebességének, valamint a terhelések intenzitásának növelésével kaphatók meg az élettartamra vonatkozó adatok. Az előző felosztásba nem is illeszthető ez a stratégia, hisz az információt hordozó mintaelem nem a felhasználási folyamatból, hanem a gyártási tételekből származik. Visszacsatolás a gyártási paraméterekre viszonylag gyorsan lehetséges, de csak a modellezett körülmények valóságának mértékétől függően lehet jó. A valóságban fellépő viszonyok legtöbbször komplexebbek, így az eredmények viszonylagos pontatlanságára számíthatunk.[17]
- Vevői reklamációk alkalmával a rövidebb-hosszabb időt üzemelt hibás elemeket visszagyűjtik, és az ezen időtartam alatti károsodás vagy hiányosság elemzésével jutnak értékelhető információhoz. Az adatok jóságát az üzemi körülményekről megszerezhető

információk bősége és pontossága határozza meg. Mindig kérdéses, hogy a gyártói előírásokat követő üzemi viszonyok, vagy extrém körülmények okozták-e a tönkremenetelt, továbbá, hogy a többi használati egyed sokaságának állapotát reprezentálja-e az a néhány problémás minta? Tovább rontja a reprezentativitást, hogy reklamációt csak a rendkívül rövid élettartamú egyedek hordoznak, amelyek statisztikai értelemben vett tételhez tartozása kérdéses, vagyis a későbbi visszacsatolás nem a sokaság nagy megbízhatósággal meghatározott általánosítható tulajdonsága alapján történik. Lényegében off-line vizsgálatok, de bizonyos szempontból a szélsőséges (rossz) tulajdonságokat hordozó elemekre. Nagy kockázatot hordozó hibák esetén az ilyen káreset-elemzés viszont az egyedi hiba megismétlődésének megelőzését nagyban segítheti, hiszen egy korán kialakuló és felderített hiba kivizsgálásával, és az azonos tételből származó egyedek visszahívásával, célzott javításával a potenciálisan kialakuló veszteség esélye drasztikusan csökkenthető (hasonlóan, mint pl.: repülőgépgyártás, autógyártás, gyógyszeripar, élelmiszeripar stb.)

- A normál üzemben használt berendezéseket és egységeiket az élettartamuk vége felé, vagy karbantartásuk alkalmával off-line módon megvizsgálják. Bár nagy tömegű adat nyerhető, de a nagy pontosság érdekében vállalt vizsgálati méret nagy költséggel járhat. Jól dokumentált üzemi paraméterek és „eseménytörténet” megbízható adatbázis létrehozását teszi lehetővé. Általános trendek, kapcsolatok, kereszthatások szignifikáns megállapításokat eredményeznek. A probléma, hogy rendkívül lassú a visszacsatolás. Komoly problémák esetén rendszerint nem várható meg, és az előző stratégiát kell követni.
- Szintén normál üzemben a folyamatba integrált műszerekkel és az egyedek állapotára nézve jó indikátor paramétereinek figyelésével on-line és in-line módon is szereshető információ. A visszacsatolás késedelmét szinte csak a távoli helyszínek közti jelfeldolgozás technológiája és a beavatkozási rutinok szabják meg. A probléma, hogy az indikátorokat csak az ismert hibákat okozó ismert tényezőkre lehet megtalálni, kijelölni és felműszerezni. A sokszor rádiófrekvenciás jeladással megvalósuló adatgyűjtés a váratlan, újszerű, eddig nem műszerezett problémákat nem tudja figyelni és előre jelezni.

A jelen lehetőségekhez mérten, de az adatgyűjtési-megfigyelési technika bővítési lehetőségét is kihasználva kívánjuk tézisként kidolgozni ez utóbbira épülő módszertant.

5.4. A szűrők diagnosztikája az üzemeltetési gyakorlatban

Hogy a szűrőelemek, modulok, kazetták alkotta strukturált rendszer kellően biztonságosan ellátja-e a szeparációs feladatot, rendszeres üzem közbeni *on-line*, és üzemből kivont *off-line* vizsgálatok egyaránt szükségesek.

Az ivóvíz tisztítás technológiája során, a modulok integritásának tesztelésére az ún. „statikus nyomáselemlési tesztet” alkalmazzák, az elhasználódás során megjelenő hibák, lyukak, repedések felderítésére.

Ezen *on-line* nyomáselemlési vizsgálat során az egyébként negatív nyomás alatt áramló permeátum anyagáramlását megállítják, levegőt juttatnak a membráncsövekbe a permeátum irányából, és a modulokat a hidrosztatikus nyomást meghaladó mértékű, pozitív légnyomás alá helyezik, majd a modult/kazettát/szűrőrendszert lezárva, adott ideig nyomás alatt tartják. Mindezt csak olyan mértékig, hogy a membránon még éppen ne alakulhasson ki levegő visszaáramlás a nyersvízbe. Ekkor a membránra a nyersvíz oldali folyadék felületi feszültsége tart egyensúlyt a belső

túlnyomással, és akadályozza meg a visszaáramlást. A tapasztalati szint feletti nyomásesés („nyomáselhalás”) a meghibásodás jele. Az egyensúly határállapotát jellemző nyomásviszonyokat tapasztalati úton állapítják meg, a pórusméret és a viszkozitás függvényében, elvi számítással, valamint a közeg pillanatnyi fizikokémiai állapotjelzői szerint.

Amennyiben a membránok valamelyikén, vagy a konzolba való beragasztás helyén sérülés van (logikusan a pórusméretnél nagyobb nyílás, repedés), akkor nyomásesés jelentkezik. Ha ez a „nyomáselhalás” meghalad egy tapasztalati értéket, javító beavatkozásra van szükség.¹³ Rendellenesség észlelésekor az addig bontatlan kazettából a kb. 3-5 elemű modulcsoportok kiszerezésével és off-line módon, próbamedencében újabb nyomásvizsgálat elvégzésével lehet lokalizálni a hibás membránt tartalmazó modult. A modulokon belül a membránok szakaszolásával és lezárásával, vagy a modul cseréjével hárítható el a hiba.[2]

A megfelelő működés igazolására is alkalmas tesztelési eljárásokat tartanak fenn, amelyekből ugyanakkor a műszaki fejlesztésekre is használható élettartam adatok nyerhetők ki, megfelelő módszertan kidolgozásakor. Ezen vizsgálat típusok az alábbiak:

A beüzemelés folyamán jelentős mennyiségű vizsgálat folyik a szűrők, kazetták és blokkok megfelelőségének igazolására, és a vevő felé a hibamentes, az elvárt paraméterek melletti működési állapot bizonyítására. Ez jelentős mennyiségű adminisztratív ellenőrzést, validálási procedúrát, valamint valós bevizsgálásokat, teszt-sorozatokat jelent.

A technológiában az indítást követően rendszeresen nyomáselhalási teszteket végeznek a szűrőrendszer megőrzött szerkezeti integritásának igazolására. Ez, mint következményt garantálja, hogy a patogének és szennyezőanyagok nem kerülnek a tisztított vízbe.

A távfelügyeleti rendszerrel való rendszeres adatlekérés a szűrők és a víz állapotáról folyamatos monitorozást, és ennek eredményeként „tiszta” vizet eredményez. Hiba esetén lehetőséget teremt az azonnali információszerezésre és a visszacsatolásra.

Még a kevésbé igényes szennyvizes alkalmazásoknál is folyamatos megfigyelés alatt tartják a legfontosabb vízparamétereket, mint pl. a turbiditást.

5.5. A vizsgálatokra épülő elemzések

A jelen kutatói munkában és azon túl, az „élettartam menedzselés” időszakában rendszeresen élettartambecsléseket és elemzések sorát kell megtervezni és elvégezni annak megállapítására, hogy az élettartamot meghatározó tényezők ismeretében (pl. klórtartalom, fluxus, nyomáslefutási profil, visszamosási és levegőztetési ciklusok) milyen élettartam kilátások vannak. A felhasználással párhuzamosan zajló elemzések fajtái és általános menete a következőkben foglalható össze:

¹³ Elvi lehetőségként akár akusztikus műszerekkel is lehetne detektálni az ilyen kiáramlással járó nagyobb sérüléseket, kellően nagy jel-zaj viszony esetén. [30], [61] Problémát okozna bizonyára a szűrőelemeken megtapadó szűrlet és a nyersvíz közeg miatti változó akusztikus tulajdonság.

- Élettartam klórterhelés számítása az in-line módon érkező üzemeltetési adatokból.
- Egyenértékű működési idő számítása az in-line módon érkező üzemeltetési adatokból.
- Laborban végzett (off-line) „öregítő-vizsgálatok” gyorsított vizsgálati körülmények között szerzett adatai.
- Karbantartási beavatkozások tapasztalatai a károsodásokról és más hibajelenségekről.
- Reklamációk eseteinek kivizsgálásai a gyártási hibából és egyéb események miatt bekövetkező károsodásokról.

A részletes elemzéseket és a levont következtetéseket a következő fejezetben bevezetett fogalmak ismertetése utáni részekben mutatjuk be.

6. Fogalmak bevezetése az elemzési metodika kidolgozásához

A dolgozat legfőbb célja olyan módszerek és számítások kidolgozása, amelyek alkalmazásával az üzemeltetést, karbantartást és újjáépítést végző szervezetek a használat során minél pontosabb becslést adhassanak a szűrőlétesítmények elemeinek élettartam kilátásaira. Ez a beavatkozások tervezését, cserék időpontját, beruházási döntéseket támogathatja objektív adatok szolgáltatásán keresztül.

Elsőként meg kell teremteni annak a lehetőségét, hogy a különböző terhelési környezetben és igénybevételi szinten üzemeltetett berendezésekről érkező adatok azonos elhasználtságot tükrözzenek. A valóban megélt élettartamban akár jelentős különbségeket okozhat:

- az eltérő földrajzi szélességi körökön üzemelés, amely tipikusan a közeghőmérséklet eltéréseiből adódó eltérő viszkozitás miatt jelenthet eltérő terhelést
- a szennyvíz vegyi összetételének sajátosságai
- a felhasználási terület miatt adagolt anyagok okozta terhelések
- a szűrőkön alkalmazott fluxusok, amelyek az életkortól függően azonos anyagáram esetén is eltérő terhelést jelenthetnek,
- üzemeltetői szokások, eltérő beállítási paraméterek, néha fegyelmetlenségek,
- karbantartási események eltérő ciklusai és technológiai jellegzetességei, ...

Mindezek figyelembevétele érdekében fogalmakat és számítási módokat alkotunk a működésben eltöltött idők egyenértékűvé transzformálására.

Másodsorban az összemérhető élettartamok ismeretében élettartam elemzéseket végzünk szokott módszerekkel, de nem megszokott adatok alapján.

Harmadszor az előző fázisok megállapításaiból kiindulva a gyakorlati alkalmazhatóságot vizsgáljuk meg.

6.1. Terhelést és élettartamot is kifejező egységesített fogalomrendszer bevezetése membránszűrőkre

6.1.1. Az „élettartam klórterhelés” fogalmának bevezetése és számítása

Az üzemszerű tisztítási műveletek (visszamosás és levegőztetés) ellenére is szükség van hatékonyabb eljárásokra a szűrőlepleny eltávolítása, és a szerves szennyeződés vegyi lebontása érdekében. Alapesetben (hatékony előtisztítás, normál szennyezettség, mérsékelt égővi telepítés) megközelítőleg *egyhónapos* ciklusidővel kis koncentrációjú (~500 ppm) nátriumhypokloritos kezelés szükséges, normál üzemi hőfok alkalmazása, viszont leállított üzemvitel mellett. (*karbantartó tisztítás - K*) Az alacsony koncentráció azonban meghaladja az üzemszerű szűrésnél elfogadható értéket, így a szerkezetre már fokozott roncsoló hatással van a közel félórás kezelés, tehát élettartamot csökkentő tényezőként tartjuk számon.

Az előzőnél még hatékonyabb karbantartó tisztítást végeznek, amikor az üzemvitelből való kivétel mellett *évente egyszer* magas hőmérsékleten, nagy aktívklór koncentráció (~1000 ppm) mellett körülbelül egy napos időtartammal avatkoznak be. Az előzőeknél természetesen sokkal nagyobb öregítő hatást okozva a membránok szerkezetének. (*felújító tisztítás - F*)

A két hatás a membránok élete során kumulálódik, ezért a klór okozta élettartam csökkentő hatás a működés és a karbantartási folyamat alatt elszenvedett dózissal fejezhető ki, és mint öregítő faktor a *klórterhelés* számértékkel jól jellemezhető, azaz:

$$LCI(ppmh) = konc(ppm) \cdot idő(h) \quad \{31\}$$

Mivel a beavatkozások hőmérséklete, klórkoncentrációja eltérő sebességgel degradálja a polimerek anyagát, az elemzéseknél a későbbiekben figyelembe veendő számszerű tényezőre az „élettartam-klórterhelés” (LCI_{total}) kifejezést vezetnénk be. A pontosság miatt célszerű az alábbi összefüggésekbe lehetőség szerint a normál üzemben előforduló esetleges klór-adagolásokat, a hőmérsékleteket és az öregítést elősegítő hatásokat is figyelembe venni. [2. tézis] A normál üzemi klórterhelést olyan technológiáknál lehet elképzelni, mint pl.

- ipari víztisztításnál, ahol már a mikroorganizmusok alacsony mennyisége sem fogadható el a szűrés után, vagy
- a lakosságnak szánt ivóvíz szűrésénél, ahol a tisztítási és az azt követő rövid felhasználási időszakban is meg kell tartani a biológiai tisztaságát.

$$LCI_{total} = LCI_O + LCI_K + LCI_F, \text{ [ppmh]} \quad \{32\}$$

vagyis kifejtve

$$LCI_{total} = \sum T_0^* \cdot cc_0 \cdot t_0 + \sum T_K^* \cdot cc_K \cdot t_K + \sum T_F^* \cdot cc_F \cdot t_F \text{ [ppmh]} \quad \{33\}$$

ahol a jelölések jelentése:

<i>jelölés</i>	<i>mértékegység</i>	<i>jelentés</i>
„LCI”	[ppmh]	élettartam-klórterhelés
„T*”	[-]	hőmérsékleti faktor, amely magasabb hőmérsékletnél magasabb értéket kap, de az egyes beavatkozás típusoknál egységesíthető
„cc”	[ppm]	a kezelésfajtánál alkalmazott Cl koncentráció értékek
„t”	[h]	az egyes beavatkozás típusok összegzett ideje, ameddig az adott állapotjelzőkkel illetett közeg hatott a szerkezetre
„O”	–	indexként a normál üzemet jelöli, amikor Cl-t adagoltak a nyersvízhez.
„K”	–	indexként a karbantartási beavatkozást jelöli, leállított üzem, kiszerezelt kazetta, kevés Cl, kis hőmérséklet
„F”	–	indexként a helyreállító beavatkozást jelöli, leállított üzem, kiszerezelt kazetta, magas Cl tartalom, magas hőmérséklet

A tényleges számításhoz jól becsült időtartamokat kell megadni, ami a legegyszerűbb esetben az ismert üzemeltetési szokásokból, K és F ciklusok általában alkalmazott gyakoriságából és hosszából, és ezek normál üzemhez mért arányából kiszámítható. Vagyis a megközelítőleg pontos terhelés számításához a kérdéses élettartamból meg kell határozni a t_0 , t_K , t_F időszakok tényleges mennyiségét.

6.1.2. Az „egyenértékű működési idő” fogalma és meghatározásának modellje

Az irodalmi áttekintésben (3.2.3 fejezet) már megemlítésre került az az elképzelésünk, hogy az élettartam adatok összemérhetőségének érdekében a különböző környezetben tartózkodó egyedeket az őket ért igénybevételek szempontjából közös vonatkoztatási alaphoz képest nézzük. Ezt ott az egyenértékű működési idő fogalmának bevezetésével a kopásintenzitásra meg is tettük. Ebben a részben a szűrőmembránokra konkretizáljuk a jelentését és lehetséges számszerű megadását.

Az ilyen módon kalkulált élettartam adat ismerete terméktervezési és üzemeltetés-tervezési előnnyel jár, valamint összehasonlíthatóvá teszi az akár különböző környezetben üzemelő egyedek élettartamait.

A szűrőmembránok élettartamát viszonylag kevés, jól elkülöníthető, szabályos ciklusokként megjelenő, és ezért jól számszerűsíthető igénybevételi szakasz határozza meg. Ezen szakaszokban halmozódó károsodások építik le a szerkezetét, vagy egyéb módon hozzák közelebb a végső tönkremenetel idejét. Egy víztisztító telepen beszerelt szűrőkazettákra és benne a membránok sokaságára azonos környezeti feltételek és igénybevételi sajátosságok (igénybevételi arculat 40. ábra) jellemzőek.

Ezen szakaszok:

- Szűrési-visszamosási ciklusokból álló, közel azonos igénybevételi szakasz, téli üzemi viszonyok mellett.
- Szűrési-visszamosási ciklusokból álló, közel azonos igénybevételi szakasz, nyári üzemi viszonyok mellett.
- A fenti üzemi körülmények mindegyike bizonyos esetekben, ivóvízbe tápláláskor enyhe klóradagolással (1-2 ppm)
- Pihentetés közbeni levegőztetésre jellemző igénybevételi szakasz.
- **K** (karbantartási) periódusok, alacsonynak számító hőmérséklet mellett, alacsony (de a normál üzemhez képest emelt, kb. 500 ppm) koncentrációjú klórtartalom, áramlásmentes viszonyok mellett, 2-5 órás időtartam.
- **F** (felújítási) periódusok, magasnak számító hőmérséklet mellett, magas (kb. 1000 ppm) koncentrációjú klórtartalom, áramlásmentes viszonyok mellett, 20-30 órás időtartamig.

Ezen felsorolás szerint ötféle igénybevételi szakasz váltakozása tölti ki a szűrők élettartamát. A szakaszok rendszeres előfordulási gyakorisága és időtartamai alapján kiszámítható az egyes szakaszok mennyiségi aránya.

Egy-egy szakaszra az egyenértékű üzemidő megadása a 3.2.3 fejezet alapján, az alábbi módon válik általánosan számíthatóvá:

$t_{e_i} = t \cdot a \cdot b \cdot cl \cdot d \cdot e \cdot f$ <p style="text-align: center;">{34}</p> <p>és ezek tervezett vagy tapasztalt előfordulási mennyiségei összegzése alapján az egyenértékű élettartam (τ_e).</p> $\tau_e = \sum_{i=1}^n t_{e_i}$ <p style="text-align: center;">{35}</p>	<p>ahol:</p> <p>t_{ei} – egyenértékű üzemidő az i-edik igénybevételi szakaszra [h]</p> <p>t – az üzemelési időszak hossza, amelyen belül a súlyozó faktorok azonosnak tekinthetők [h]</p> <p>a – a hidrodinamikai terhelés mértéke szerinti faktor egy referenciaterheléshez viszonyítva, az igénybevételi szakaszban, százalékos jelentésű, de számszerűen egyet meghaladó arányskálán. Kísérletekkel pontosítható szubjektív skála. [-]</p> <p>b – a hőmérséklet, és az ebből eredő viszkozitás-növekedés, és a kicsapódási hajlam hőfüggése miatti eltérő terhelés szerinti faktor egy referenciaterheléshez viszonyítva, az igénybevételi szakaszban pl.: százalékos jelentésű, de számszerűen egyet meghaladó arányskálán. [-] Kísérletekkel pontosítható szubjektív skála.</p> <p>cl – a klórtartalom miatti károsítás mértéke szerinti faktor az igénybevételi szakaszban, egy objektív skálán. A faktor a természetes mértékegységben [mill.ppmh] kifejezhető Cl koncentráció értékeinek arányát mutatja egy gyakorlati minimum Cl terheléshez viszonyítva. A teljesen klórmentes üzemelés esetén ez tehát minimálisan 1-et érhet el.</p> <p>d – a tartós eltömődési hajlam szerinti faktor az igénybevételi szakaszban, ami a tönkremenetelt gyorsíthatja (1-et meghaladó), vagy akár lassíthatja (0-1-ig) szubjektív skálán [-]</p> <p>e – az adott környezetre jellemző, a vízben kicsapódni képes anyagok telítettségével összefüggő faktor (1-et meghaladó), ami a tönkremenetelt gyorsíthatja. Egy objektív keménységi számértékből konvertálhatóan. [-]</p> <p>f – eddig ismeretlen okból számításba vehető faktor az igénybevételi szakaszban, ami a tönkremenetelt gyorsíthatja pl.: százalékos jelentésű, de számszerűen egyet meghaladóértékű egy arányskálán értékelve. Kísérletekkel pontosítható szubjektív skála. A faktor a tönkremenetelt gyorsíthatja (1-et meghaladó faktor), vagy akár lassíthatja (0,1 - 1-ig) szubjektív skálán. [-]</p>
--	--

A gyakorlati vizsgálatoknál az egyedre terhelést jelentő károsodási idő – vagy másként öregítési idő – a fogalom bevezetésével nem csak az élettartam során elviselt összes klórterhelés (LCI) megadásával, hanem más öregítő faktorok figyelembevételével is lehetségessé válik.

A kutatást lehetővé tevő cég esetében – és így a dolgozatban végzett tényleges méréseknél – a fent leírt üzemi változóknál és az ezekből számolható faktoroknál kevesebb állt a rendelkezésünkre, így a számítási mód is némiképp módosult. Az elvileg megállapított összefüggést tehát célszerű mindig az adatszerzési és -kezelési sajátosságokra aktualizálni a használhatóság érdekében. [3. tézis]

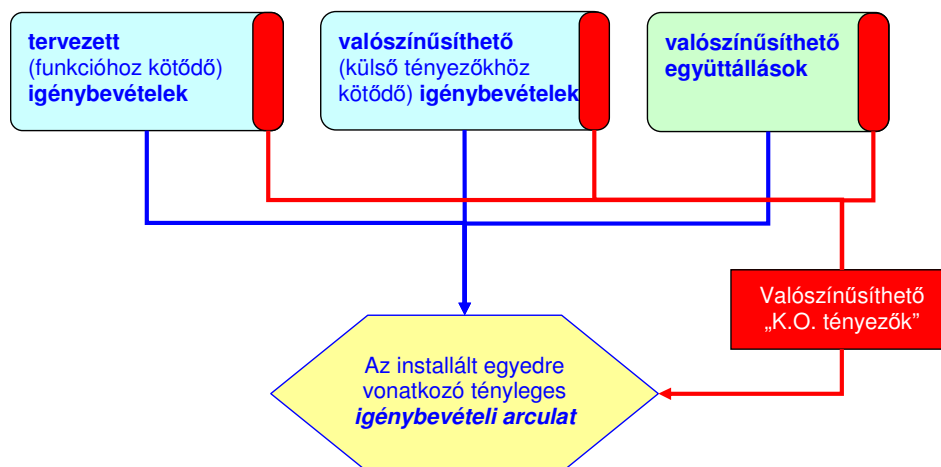
6.1.3. Az „igénybevételi arculat” fogalmának bevezetése

A pontosan a vevői igényekre szabott termékeket a legjobb esetben is csak egyedi gyártással lehet megvalósítani, de ilyenkor is feltételezni kell, hogy az igények a későbbiekben már változatlanok lesznek. Bizonyos módosításokra talán lehetőség nyílik, de generális változásokat már nem lehet megvalósítani sem gazdasági, sem technológiai megfontolásból. Igény szerint

módosított paraméterekkel, opcionálisan választható megoldásokkal a sorozatgyártás termékei és hozzá kapcsolódó szolgáltatások is segíthetik a vevői igényhez való közeledést.

Viszont óhatatlanul fellép az a jelenség, hogy egy általánosan elképzelt igénybevehetőségre tervezett egyed a valós igénybevételi környezetbe kerülve kissé eltérő teljesítményt nyújt. Még ha bírja is a konkrétan kialakuló hatásokat és szinergiákat, más üzemi paramétereket és élettartamot produkál, mint egy másik környezetben üzemelő társa. Ebből következően a várható élettartam, vagy a szükséges karbantartási beavatkozások tervezésénél minél pontosabban célszerű megadni az igénybevételek minőségi és mennyiségi jellemzőit. Erre a nagyon soktényezős változóra, amely az igénybevételi környezetet pontosan leírja, bevezethetjük az *igénybevételi arculat* kifejezést. Bár a teljességre törekvő megadásakor számokkal és szavakkal leírható jellemzés is szükséges lenne, a matematikai kezelést csak egy arányskálán számszerűsíthető, esetleg két (igen–nem, 0–1) vagy három ($-1 - 0 - +1$) logikai értékkel adott paraméterekkel tudjuk megvalósítani.

Az igénybevételi arculat általános elemei az alábbi kategóriákba sorolhatóak. A diagram az igénybevételek további lebontását is segíti.



40. ábra Az igénybevételi arculat általános kategóriái

A nyilvántartás alapján kiválasztunk olyan paramétereket, amelyek az élettartam szempontjából meghatározó jelentőségűek, így ezeket az elterjedt szóhasználat szerint „KO” paramétereknek neveztük el. A kiválasztás történhet korrelációs elemzések sorozatán keresztül, vagy a minőségügyi gyakorlatban kedvelt, ésszerűen koreografált csoportmunkát feltételező, szakemberek szubjektív döntéseiből konszenzusként kapott döntésekkel.

Az igénybevételi arculat logikusan egy adott helyen üzemelő egyedek halmazára értelmezhető, hiszen az igénybevételeket nagyban befolyásolják az alábbi tényezők:

- földrajzi adottságok, mint pl. a szürendő közeg átlagos hőmérséklete és az ebből következő viszkozitás, vagy a betáplált vizek keménysége
- a szennyvíz származásával összefüggő jellege, azaz milyen arányban van jelen a csapadékvíz, kommunális szennyvíz, vagy a speciális szennyezőanyaggal jellemezhető ipari szennyvíz stb.
- az alkalmazott technológia, vagyis a membránszűrés műveletét megelőző vízkezelési lépések, pl. mekkora a bennmaradó lebegőanyag-tartalom, kívánnak-e klórt alkalmazni,

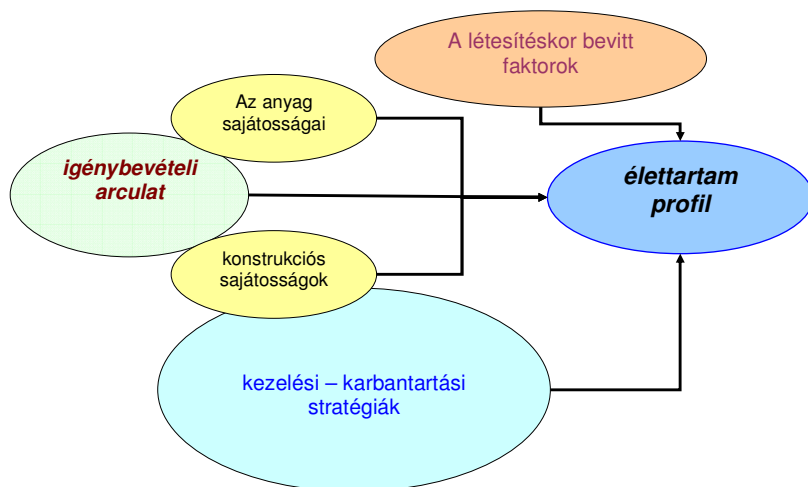
- milyen fluxus-igényt támasztanak az elemekkel szemben, és milyen a működésre jellemző nyomásváltozási időfüggvények szintje és lefutása

Az igénybevételi arculat meghatározásának és a további feldolgozásoknak a módszerét a 7.5 fejezetben követhetjük nyomon.

6.2. Az élettartam-profil jelentése, kialakításának általános elvei

Általában a termékek tervezésénél, fejlesztésénél, vagy a nagyobb karbantartásokat megelőző információgyűjtésnél szinte nélkülözhetetlen ismerni, hogy a terméknek, termékek csoportjainak milyen élettartama várható, illetve az élettartamának milyen szakaszában van, vagyis az adott életkorban mekkora a valószínűsége a tönkremenetelnek. Mindezek a kérdések akkor válaszolhatóak meg a legpontosabban, ha ismerjük a termék eredendő tulajdonságai mellett az igénybevételi arculatát. Az anyag és konstrukció, valamint a használat paraméterei és jellegzetességei fogják meghatározni az elhasználódási folyamatot.

Az élettartam profil tehát mindaz az információ halmaz, amit egy ismert sokaság (termék típus és annak elkülöníthető tétele) egy egyedének a tönkremeneteli formáiról és azok bekövetkezési esélyeiről tudunk, egy jól körülírható, és időben is megismerhető igénybevételi környezetben („igénybevételi arculat” mellett).



41. ábra Az élettartam profil meghatározó tényezői

Az élettartam profil az alábbiakban összefoglalt elemekből állítható össze a 41. ábra kifejtéseképpen. Ezek közül az első csoportban a működés során tudatosan befolyásolható tényezőket, míg a másodikban a későbbi üzemelés során már nem befolyásolható, passzívnak nevezhető tényezőket soroljuk fel.

A működés során befolyásolható tényezők és paraméterek:

- A szerkezethez felhasznált anyagok, azok kölcsönhatásai egymással és a környezetükkel, eredeti öregedési tulajdonságok.
- A szerkezet konstrukció sajátosságai, társítások, összeépítések, igénybevételek rávezetésének módjai.
- A kezelés gyakorisága, intenzitása, szakszerűsége.
- A hibajavító és karbantartó beavatkozások gyakorisága, stratégiája, szakszerűsége.

Később nem befolyásolható, tehát passzív tényezők:

- Az előállítás technológiája során bevitt, az öregedést késleltető vagy gyorsító hatások.
- Az előállítás során az egységek között kialakuló, véletlen különbségek, amelyeket a folyamat ingadozása, stabilitási problémái okozhatnak.
- A szerkezet installálásával összefüggő, az élettartam esélyeket befolyásoló események jótékony vagy káros hatásai.
- Igénybevételi arculat (kifejtve a 7.2-ben): Igénybevételek fajtái, időbeli lefolyásuk és mértékük, köztük levő szinergikus kapcsolatok.
- Kezelési és karbantartási események, amelyek véletlenszerű hatásokként alakulnak ki, de nagy befolyással lehetnek az élettartamra.

A kezelési és karbantartási elemek mintegy metszetet képeznek az igénybevételi arculattal, hiszen ezen beavatkozások sokszor közvetlen – a normál működtetéstől idegen – igénybevételeket jelenthetnek, valamint elállítják az igénybevételek fajtáit és azok mértékét. Ilyen „elállítás” pl. ha egy csapágycserénél kissé megváltozik a berendezés egytengelyűsége, (akár javul, akár romlik), vagy ha az előtisztítási folyamat karbantartása folytán kicsit más összetételű nyersvíz jut az ultraszűrő egységre.

A ténylegesen egyed- és felhasználás-specifikus „profil” alatt leginkább az élettartam függvényeken megjelenő alakzatokat érthetjük. Ezekben belül is:

- A kiesési ráta függvényét, hisz az minden időszakban a meglevő állományra vonatkozó gyakoriságot ábrázolja. Ezen mutatkoznak meg leginkább az összetartozó egyedek tönkremeneteli jellegzetességei, a gyorsuló, lassuló vagy véletlenszerű tönkremenetek sajátosságai.
- A kiesési valószínűség függvényekkel való elemzés gyakorlati kivitelezését viszont kellően jól segíti az élettartamhálón való ábrázolás. Az élettartam adatokból egyszerű kumulált gyakoriság számítás alapján már olyan diagram rajzolható a hálózaton, amely az előbb említett szakaszokat biztosan és egyszerűen kimutathatja.

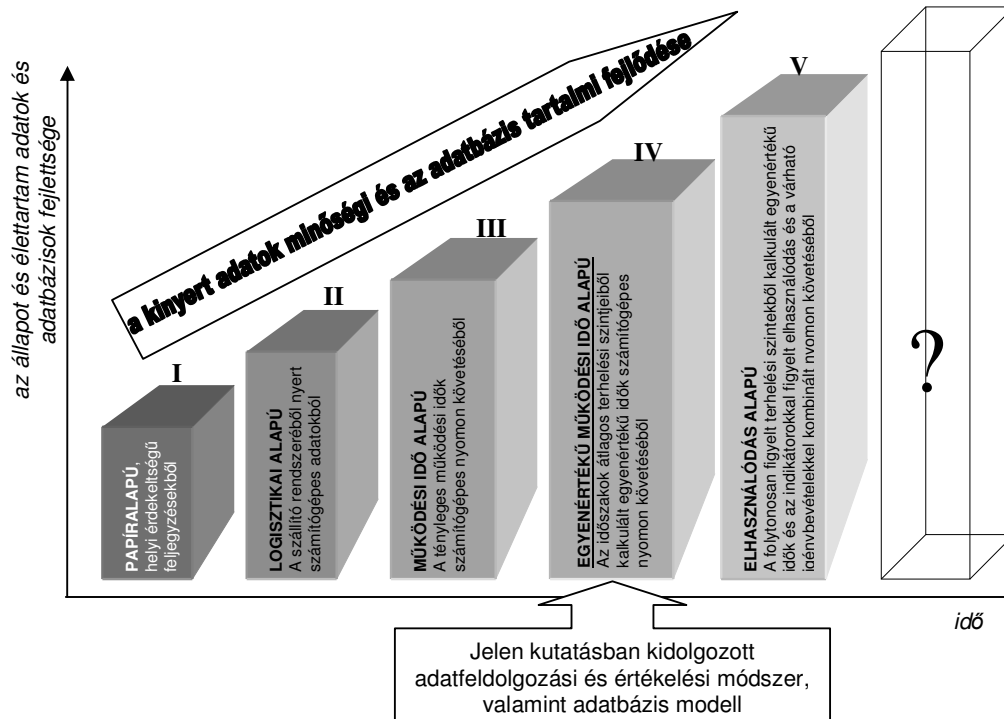
Kutatási gyakorlatunkban leginkább a valószínűségi hálón történő ábrázolást alkalmazzuk, az iparban mutatkozó gyakorlathoz hasonlóan. Ezek a diagramok az elvi megközelítés és a tapasztalatunk szerint egyaránt pontosan kirajzolják a tönkremenetek módját és mértékét, valamint a szakaszok időtartamát a termékek élettartama során.

Könnyen észrevehető a 41. ábra kategóriáin belüli paraméterek vagy az igénybevételi feltételek változásainak hatása a diagramra.

7. Az élettartam adatok feldolgozási módszerének elvi kialakítása és megvalósítása

7.1. Az élettartam kifejezésének megközelítései, becslési technikáinak problémái

Ahogy azt az 1.2 fejezetben már említettük, az élettartammal kapcsolatos adatok és az őket befogadó adatbázisok minősége és használhatósága egy fejlődési vonal mentén képzelhető el. Az egyes szinteken megkapható élettartamok a számítási módszerek változása miatt általánosan rövidebbek lesznek.



42. ábra Az élettartam adatok nyomon követésének és az előre- és visszacsatolásra alkalmasabb adatok minőségének fejlődési vonala a kutatási eredmény elhelyezésével

Eszerint a hagyományos *papíralapú* adatbázis – de az egyszerű „Excel” táblában vezetett is – csupán feljegyzésnek tekinthető, amely pontossága a feljegyzést tevő precizitásán múlik. Az egyedek termék kategóriához is mérhető elhasználódásának mértékét naptári időben adhatjuk meg.

Megfigyelhető, hogy a *logisztikai időt* (az azonos helyen, azonos funkciót ellátó egyedek cseréjénél a ki-/beszállítás időpontjai közti különbség) vezető adatbázisban adott időtartamhoz képest a fejlettebb *működési idő alapú* megadásnál még kisebb időtartam adódik. Itt már csak a működésben eltöltött idő számít. Vannak esetek, amikor a működésen kívüli állapot nem jelenti a terhelés és így a károsító hatások megszűnését. (pl. membránszűrőknél a legnagyobb klórterhelést nem a működés, hanem épp a karbantartási eljárások során szenved el a szűrőegyed, vagy a feltöltött folyadékokkal, nyomás alatt álló tömítések üzemen kívül is

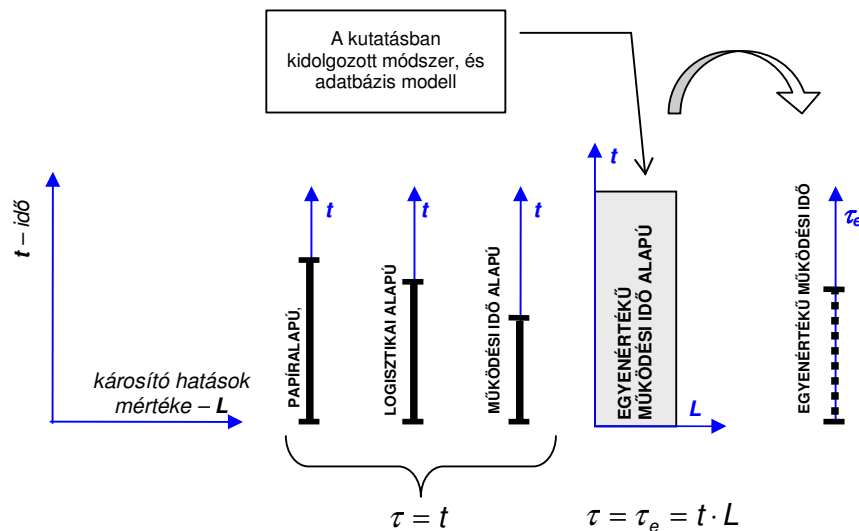
használnak). Mindezen módszerek közös jellemzője, hogy az élettartam kifejezésének a dimenziója idő.

A dolgozatban ismertetett és a gyakorlatban ki is próbált **egyenértékű élettartam** már lényegében kétdimenziós eredményt szolgáltat, hiszen a csak „idősíkból” kilépve a terhelések mértékével súlyozza a naptár szerinti vagy működésben, illetve károsító hatások közt eltelt időtartamot. Valójában az ábrán jelzett „ τ ” egy szorzatként geometriai megfeleltetéssel összegződött területként utal az elhasználódás mértékére.

Amennyiben az egyes módszerekkel kapott időtartamokat hasonlítjuk össze, megállapíthatjuk, hogy a számított élettartamok az egyszerűbb adatgyűjtési formáknál általában nagyobbak és „lineárisak”, mivel egyetlen időparaméterrel kifejezhetőek („egydimenziós” mennyiség). A fejlettebb adat felvételezések magukba foglalnak más adatforrásokat is, ezért újabb „dimenzió” jelenik meg bennük (második dimenzió – az igénybevétel szintje). Az idő és az igénybevételek korrelálnak a kiesési statisztikák adataival, melyből következtethető egy integrált tönkremeneteli szint, ami az elhasználódás mértékével fejezhető ki. Az alábbi ábrán a termékegyedek elhasználódásának és az élettartamuk során elszenvedett terhelések szintjének komplex jellegét fejezi ki, ha a tönkremenetelleket egy koordináta rendszerben jelenítjük meg.

A kutatás további finomítással értékelheti a független külső paramétereket, mint a terhelés egyes összetevőit. Ezek között a korábbi fejezetben a hőmérsékletet, a nyomásviszonyokat és a klórterhelést találtuk fontosnak. Ez a logikai lebontás a „kétdimenziós” megközelítést „többdimenzióssá” teheti.

A „kétdimenziós” élettartamot meghatározó modell segítségével megadható jellemző is élettartam jellegű lehet, ha az igénybevételi szinteket dimenziómentes arányszámok képviselik (amiként a 6. fejezetben a problémát megközelítettük). Ekkor a további dimenzió számszerűsítése nehezítő, vagy könnyítő faktorként jelentkezik, és egynél kisebb vagy nagyobb tényezőként növelheti vagy csökkentheti a naptári élettartam hosszát.



43. ábra Az élettartam (τ) kifejezése (kiterjesztése) az egyes módszerek adatbázisai szerint Első dimenzió – a működési idő, második dimenzió – az igénybevétel szintje, harmadik dimenzió – az integrálódott tönkremeneteli szint

7.2. A „tételhatár” problematikája az elemzésekben

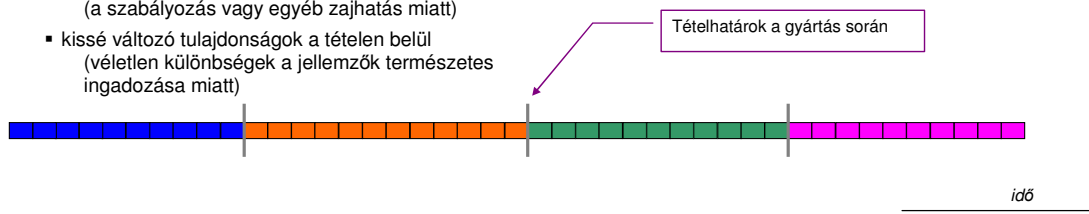
A termékegyedek élettartam-tulajdonságait alapjaiban meg tudják határozni az eredő tulajdonságaik, amelyek a gyártási tételek váltásakor véletlen vagy szándékos módon változhatnak. Ezek visszakövetése a gyártásig/kibocsátásig jelentős problémákat vetnek fel.

7.2.1. A tételhatár kialakulása a gyártás és kibocsátás során

A tételhatárok kialakulása egy stacioner folyamatban rendszerint káros jelenség. Ha valamely tulajdonságot direkt akarunk változtatni, fejlesztés vagy helyesbítő intézkedés miatt, akkor annak szignifikáns különbségét akarjuk a tételhatárokon észlelni. A nem szándékos változtatásnál viszont káros jelenség a kimutatható különbség. Ami biztos, hogy ha a folyamatosan gyártott termékek közt szignifikáns különbség egyáltalán kialakulhat, akkor az nagy eséllyel a tételhatárokon lehetséges (44. ábra).

A gyártási tételek jellemzői a kibocsátáskor:

- változó paraméterek a tételek között (tervezett változtatás miatt)
- kissé változó paraméterek a tételek között (a szabályozás vagy egyéb zajhatás miatt)
- kissé változó tulajdonságok a tételben belül (véletlen különbségek a jellemzők természetes ingadozása miatt)



44. ábra A tételhatárok megjelenése kibocsátáskor

A fenti ábra jól szemlélteti, hogy a folytonos gyártással előállított, és szándékaink szerint azonos tulajdonságú tételek közt óhatatlanul adódnak különbségek a tulajdonságok természetes ingadozásából kifolyólag. A változások sokféleségét jelzi, hogy nem csak a függetlenül alakuló változók mutatnak ingadozást, hanem az egymással szinergikus kapcsolatban levők is kölcsönös változásokat generálnak. Vagyis statisztikai értelemben teljesen azonosnak csak a technológiai értelemben egységnek nevezett tétel egyedeinek tulajdonságai mondhatók. A kibocsátás időszakában ezek az azonos tulajdonságok egyértelműen rendelhetők egy tételhez, és a helyes nyomon követési rendszer segítségével visszakereshetők, még akár a tételben belüli elhelyezkedés szerint is. Ha a tulajdonságok változása szignifikáns, akkor az határozottan kimutatható a tételhatárok váltásánál.

7.2.2. A tételhatár megjelenése az információszerzésnél a működtetési fázis során

Amennyiben az adatgyűjtés megbízhatósága szempontjából vizsgáljuk a tételhatár kérdését, megállapítható, hogy a gyártási fázist követően – azaz a gyárat elhagyva – az elemzéseknél már ritkán ismerjük a tételhatárokat. A termékegyedek „szétszóródásával” a tételek nincsenek koncentrálnva, és az egyedek viszonylatában jelentős különbségeket mutató körülmények közé kerülnek, nagyon különböző felhasználói szokások és intenzitás mellett. Ebből következően az üzemeltetésről kapott adatok nem lesznek minden esetben összehasonlíthatóak. Pontosabban, amíg az egyedek eredő tulajdonságaikból levezethető paraméterek szerint a tételhatár felfedezhető, addig a működtetési környezet és szokások által befolyásolt tulajdonságokban nagy különbségek mutathatók ki. Ez utóbbi miatt a működtetés későbbi fázisaira tett megállapításaink bizonytalanabbak lesznek. Áttételesen újabb bizonyítékot kaptunk a FIFO elv

következetes betartására, mivel az a számos gazdasági és technológiai előnye mellett az információ-visszacsatolás minőségét is javítja.

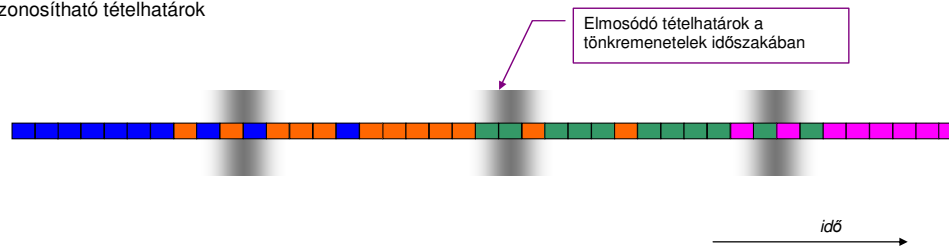
7.2.3. A tételhatár megjelenése az élettartam adatok gyűjtésekor a működés végén

Az élettartam elemzéseknél az alkatrész, a részegység vagy a komplex termék végső tönkremenetelének idejét és korábbi működtetési körülményeit figyeljük meg. Ismét nagy segítség lehet az elemzésekből levonható megbízható információk szempontjából, ha ismeretesek a gyártási tételek eredeti határai. Az egyedek élettartamában levő különbségek sokszor adódnak a tételek közötti különbözőségekből. Miután az egyed nem viseli magán a tételek közötti tulajdonság-azonosítókat, a változások tényét csak indirekt módon, az élettartam adatok és tönkremeneteli formák szignifikáns különbségeiből következtethetjük ki.

A végső tönkremeneteli időpontok azonban nem a gyártás sorrendjében fognak bekövetkezni, a korábban említett okokból. (Eredő különbségek, eltérő működési körülmények és használati intenzitás, hirtelen végzetes hatások, ...) A tönkremenetek időbeli követése során a 45. ábra szerinti jelleg rajzolódna ki.

A gyártási tételek jellemzői az üzemi időszak végén:

- egyedenként változó üzemi igénybevételi jellemzők
- egyedenként változó *idő/üzemidő* viszony, (használati intenzitás)
- egyedenként kissé változó teherbírás
- nehezen azonosítható tételhatárok



45. ábra A tételhatárok megjelenése az élettartam adatok feldolgozásakor, vagyis az egyedek használati időszaka végén

7.3. Az adatok részvétele és kezelése az elemzésekben és a „felejtő” mechanizmus

Az előző fejezetben az egyedek által hordozott tulajdonságok változásával, ezen belül is az élettartam adatok bizonytalanságainak okaival és a tételhatárok bizonytalanságot okozó kérdéseivel foglalkoztunk. A felvetődött problémáknál elképzeltük, hogy a megszerzendő információink időben állandóak, a kérdések változatlanok. Az adatszerzésnél a tételhatárok felderítésével és az eltérő működési feltételek összehasonlításával az állandó kérdéseinkre többé-kevésbé pontos válaszokat fogunk kapni.

A valóságban azonban az idő múltával a kérdéseink, és a megszerzendő információink halmaza dinamikus változásban van. Ebből következően állandó probléma lehet a gépek, termékek, jelenségek folyamatos megfigyelésénél, hogy a jelenben olyan adatokat gyűjtünk, amit már nem kellene, vagy nem gyűjtünk, pedig a későbbiekben nagy szükség lenne rá.

Az információgyűjtésre nézve az alábbi verziók képzelhetők el az adatok hasznossága és feldolgozása tekintetében:

- Továbbra is változatlanul gyűjtjük, mert a régen szerzett adatokat folyamatosan felhasználjuk, és a jövőben is bizonyosan szükség lesz a most megszerzett információra.
- A működési körülmények természetes vagy szándék szerinti változása, valamint a termék-tételek között végrehajtott változások miatt direkt vagy indirekt okból bizonyos adatok fontosságukat veszítik.
- Az is lehet, hogy az adatok megítélése változik, és ami korábban kritikusnak, elfogadhatatlannak számított, az eltűrhető vagy megfelelő lesz, illetve a korábbi tökéletes a változó környezetben mára már elfogadhatatlan.
- Nem vezetünk olyan adatokat, amire a jövőben nagy szükségünk lenne, mert a későbbiekben a tételek közti különbségek vagy a változó felhasználási igények kikényszerítik.

Elképzelésünk szerint az adatbázisainkat olyan módon kell kialakítani, hogy azok a dinamikus változó információ igényt is ki tudják elégíteni. Ehhez az alábbi lehetőségeket kell biztosítani az adatbázisok strukturális felépítésében és funkcionalitásában, számítógépes követésnél:

- Változatlan információigény mellett a korábban szerzett adatok egy időponttól kezdődően kimaradhatnak („*éles felejtés*”). Ennek módja lehet az automatikus időzítés vagy a feldolgozó szándéka szerinti. Természetesen nem csak az adatok gyűjtését, hanem a feldolgozását, az operatív munka során való felhasználását, a velük való számításokat is meg kell szüntetni.
- Változatlan információigény mellett a korábban szerzett adatok egyre kisebb súllyal szerepeljenek, majd eltűnjenek („*csúszó felejtés*”). Ez leginkább automatikus időzítéssel képzelhető el, a súlyozás algoritmus módjának megadása mellett.
- Egy új szempont bevezetése miatti változaskor az adatgyűjtésbe először bekerülő adatoknál is hasonló lehetőségekkel lehetne élni, vagyis rögtön a teljes körű gyűjtés és teljes-értékű feldolgozása megvalósul, valamint a kívánt algoritmus szerint növelve azok jelentőségét, súlyát.

7.4. Az élettartam adatbázis elvi kialakítása

Az elemzések során a kérdések megválaszolásának pontosságát és az élettartam adatokból levont következtetések megbízhatóságát alapvetően az alábbiak befolyásolják:

- a vizsgált minták homogenitása, benne az egyedek hasonlósága az élettartamot befolyásoló tulajdonságokban, valamint
- az egyes egyedekre élettartamuk során ható igénybevételek hasonlósága az intenzitás, időbeli lefutás, valamint az igénybevételek spektrumának állandósága.
- A használttól független, karbantartó és felújító beavatkozások pozitív és negatív hatásainak változatossága.
- A nem valós használat mellett végzett elemzésnél (szimulált körülmények mellett folyó gyorsított eljárások) a modellezett körülmények azonossága és teljes körűsége a valódi használati viszonyokhoz képest.

Az ilyen módon befolyásolt működési-tönkrementeli adatok élettartam elemzésre kerülnek, hogy segítségükkel az újabb felhasználási-, üzemeltetési-, karbantartási- és csereciklusok tervezhetőbbé váljanak. Az élettartam adatokból mindezen hasznos információk kinyerésének módja az élettartamfüggvények megismerésén, alkalmazásán, élettartamhálókon való megjelenítésén keresztül valósulhat meg.

Az élettartam-függvényekből tehát akkor vonhatunk le messzemenő következtetéseket, ha a megfigyelt elemek tulajdonságai és a rájuk ható igénybevételek, valamint a hatás ideje alatt a környezeti viszonyok összemérhetőek voltak. Ebből következik, hogy az élettartam függvények egy ideálisan állandó/azonos igénybevételeknek kitett, azonosságot mutató egyedek tönkrementeli statisztikáit tükrözik. Amennyiben akár az egyed-tulajdonságok, akár a terhelési viszonyok és körülmények, valamint a karbantartási beavatkozások változnak, akkor vagy a kiértékelés lesz téves, vagy eseti korrekciókkal figyelembe kell venni a változásokat.

7.4.1. Az élettartam adatbázis kialakításának szempontjai

A dolgozat célul tűzi ki, hogy az élettartam adatbázis kapcsolatot teremtsen a tönkrement egyedek számszerű és minőségi elemzése és a tervezés/fejlesztés, gyártás, valamint a karbantartás/üzemeltetési területek között.

Hogy az élettartam vizsgálat tényleg a fontos kérdésekre adjon választ, ahhoz elsőként meg kell határozni, hogy mik azok az adatok, jellegzetességek és működési körülmények, amelyek azonosítanak egy egyedet valamint egy tételt. Ezen adatok és körülményekre vonatkozó információk tükrében tudjuk később értékelni az eredményeket.

A tapasztalatok szerint az élettartam vizsgálatok általános problémája, hogy a vizsgálat lezárultával alakulnak ki a konkrét igények a megszerzendő információkra, de ekkor visszamenőleg már nem vagyunk képesek minden releváns körülményt feljegyezni, vagy működési peremfeltételt szabályozni.

7.4.2. Az elemzések bemeneti adatainak kategorizálása

A vizsgálatok során az egyedek azonosításához és az élettartam jellemzők megállapításához általánosan az alábbi információ-kategóriák szükségesek az egyedekről, csoportokról vagy az élettartam alatti hatásokról. Nem minden elemzésnél van mindegyikre szükség, a vizsgálatok jellege vagy a visszakövethetőség utáni igény szabja meg a vezetésüket. Az adattartalom néha a vizsgálat közben módosul a felmerülő igényekhez igazodva. Általános alapesetként néhány célszerűen követendő azonosítót és jellemzőt soroltunk fel:

4. táblázat Alkalmazandó azonosítók és jellemzők

Általános információk az azonosításhoz	<ul style="list-style-type: none"> • Egyedi azonosító • Környezeti azonosítók (telephely, blokk, kazetta)
Az üzembeállítás információi	<ul style="list-style-type: none"> • Az üzembe állítás időpontja • Az üzembe állítás körülményei
Az üzemeltetés információi	<ul style="list-style-type: none"> • Az üzemeltetés körülményei, hatások • Az egyedek élettartama során végzett releváns beavatkozások ténye és/vagy időpontja
A tönkremenettel kapcsolatos információk	<ul style="list-style-type: none"> • A tönkremeneteli határállapot előtt mérhető releváns paraméterek és tapasztalható jelenségek • A tönkremeneteli határállapot, vagy funkcióvesztés időpontja • A végső tönkremenetel formája

Egyedi azonosító

- Nem feltétlenül szükséges, ha a tömegesen jelentkező tulajdonságokat keressük, vagy a darabok esetleges különbözőségét nem vesszük figyelembe.
- Leginkább akkor szükséges, ha a megfigyeléseink sok szempont szerint történnek, így az összefüggések elemzéséhez össze kell tudnunk rendelni az adatainkat az egyedekhez rendelkezésre kerülő adatokhoz.
- Esetenként kiderülhet, hogy a tételtől mégis különbözik az egyed, ezért ki akarjuk zárni az elemzésből, vagy éppen fordítva, fizikailag másik tételhez tartozó egyed információit azonosíthatóan bevesszük az adatsorba, mivel a megfigyelt szempontok szerint azonosnak tekinthető.
- Általános igény az élettartam elemzéseknél, hogy azonosítani lehessen az egyedek alkalmazásának helyét, mivel ez fontos minőségi információ lehet az igénybevételek és a károsodások vizsgálatakor. Ez jelentheti a földrajzi környezetet, ipari alkalmazási területet, a telephelynek, a blokknak és a kazettának az azonosíthatóságát.

Az üzembe állítás időpontja

Részben az azonosításhoz, másrészt a naptári idő szerint végigkísért élettartam elemzésnél az események rögzítéséhez elengedhetetlen információ.

Az üzembe állítás körülményei

Azon paraméterek, amelyek a működési környezetet írják le, az igénybevételi körülményeket befolyásolják, módosítják. Mivel az élettartam során változhatnak a körülmények, az itt rögzített tényezők összetétele is módosulhat.

Az üzemeltetés körülményei, hatások

Az előző paraméterekhez képest a lista változhat, ha újabb befolyásoló tényezőkről szerzünk tudomást, vagy ejtünk ki. Hosszabb élettartamú egyedeknél a megfigyelések kezdetén még nem mindig tudjuk, hogy mely információk lesznek fontosak, ezért kiderülhet, hogy felesleges adatokat is vezetünk. Ezen változásoknak a tényét és időpontját az adatbázisból ki kell tudni deríteni.

Sok tényezőt párhuzamosan vezető alapos elemzések során a környezeti paraméterek kategorizálására és a paraméterek egyéb jellemzőire is szükség lehet. A pontos megnevezés mellett a hatás helye, értéke, változó hatások esetén pedig az időbeli lefutás leírása is szükséges lehet. Sztochasztikus jellegű hatásnál a középérték mellett legalább a terjedelme (pl.: $35 \text{ Nm} \pm 10$), vagy ismert eloszlásnál a szórása. Periodikus jellegű körülménynél amplitúdó, frekvencia, fázis, spektrum stb. is rögzítésre kerülhet. Mindezekre nyújt példát az alábbi nyilvántartó táblázat:

5. táblázat Periodikus jellegű üzemeltetési körülmények nyilvántartásba vétele

tényező sorszáma	Az üzemeltetési körülmények és számszerűsített értékei					
	Az élettartamot közvetlenül befolyásolja		Közvetetten kimutatható az élettartamra gyakorolt hatása		Tájékoztató jelleggel rögzített körülmény	
	tényező neve	állandósult értéke, vagy középértéke intervalluma (amplitúdója, frekv. vagy szórása)	tényező neve	állandósult értéke, vagy középértéke intervalluma (amplitúdója, frekv. vagy szórása)	tényező neve	állandósult értéke, vagy középértéke intervalluma (amplitúdója, frekv. vagy szórása)
1	váltakozó nyomás szűrés-visszamosás ciklusokon	átlag: ...Pa ampl.: ...Pa frekv: (1/min)				
2			páratartalom	átl: 50% ±10		
3	viszkozitás	átl:MPas				
4					tavaszi olvadás és áradás	időtartam (nap), referencia felszíni víz vízállása (m)
...						

Az egyedek élettartama során végzett releváns beavatkozások ténye vagy időpontja

Élettartama során vagy maga az egyed, vagy a technikai környezet javításra, karbantartásra szorul. Ilyenkor az élettartamot meghatározó feltételek kissé megváltozhatnak, szélsőséges esetben új, eddig nem jelenlevő hatások jelenhetnek meg, és az addigiak megszűnhetnek. Bár ezeket a hatásokat nem mindig ismerjük, de az ilyen adatok vezetésével időponthoz tudjuk rendelni az esetleges megjelenést vagy megszűnést. A későbbi elemzéseknél az egyed állapotában beálló változások időpontjai, valamint a beavatkozási időpontok és az elvégzett munkák ismeretében lehetőségünk nyílik az ok-hatás láncolatok felderítésére.

A tönkremeneteli határállapot időpontja

Hogy a tönkremenetel időpontját és így az élettartamot is pontosan meg tudjuk határozni, be kell vezetni egy egységes időszámítást. Ennek dimenziója a tönkremenetelt előidéző igénybevétel lefutásához és egyéb sajátosságaihoz kell, hogy illeszkedjen. Nagy egyedszámú populációban a megfigyeléseinket végezhetjük csoportos vagy egyenkénti követéssel. Mindkét esetben az alábbi módon lehet megadni az élettartamot kifejező *működésmennyiséget*:

- **Naptári időtartamot** vezethetünk, amennyiben a használattal eltöltött idő szorosan összefügg a naptári értelemben vett abszolút időtartammal. Az üzemelés lényegében folytonos, vagy a ciklikussága állandó, sem a használat intenzitásában, sem a terhelési szintekben nincs számottevő változás. (Pl. egy áruház légkeringető turbinája)
- Amennyiben a naptári időtől jelentősen eltér a használatban eltöltött idő, célszerű **üzemidőben** folytatni a vizsgálat időszámítását, vagyis, ha az igénybevétel kiszámíthatatlan időpontokban történik és bizonyos időszakokban nagyobb

elhasználódást realizálunk, míg máskor alig. (Pl. hóeltakarító gépek hajtóművei, hidraulikái)

- A tönkremenetelhez vezető **igénybevételi ciklusok száma**, amennyiben a tényleges használati időtartamot az előzőekben definiált időegységek nem pontosan jellemzik. Ezt akkor célszerű vezetni, ha sem a használatbavételi időpontok, sem a használati fordulatszámok és ciklusszámok nem szabályosak. (Pl. fénymásoló gép fődarabjai)
- A későbbiekben kifejtjük az **egyenértékű működésmennyiség** kifejezését, amely még az előző megadás pontatlanságát is korigálja. Előfordulhat, hogy sem az időpontok, sem az üzemelési időtartamok, sem a használati sebesség, de még a használati intenzitás sem állandó. Ez olyankor alkalmazható, amikor az igénybevételi szinttel súlyozva akarjuk számítani a használati mennyiséget az élettartam követésére. *(Pl. egy kuplung szerkezet élettartamának nem mindegy, hogy mekkora ösztömmeggel kell mozgatni egy járművet, milyen terepen és milyen vezetési szokásokkal. Szűrők esetében szintén nem mindegy, hogy a klór, viszkozitás, nyomás és áramlásviszonyok, nyersvíz paraméterek milyen üzemi paramétereinél és azok milyen kedvezőtlen kombinációjában kell működnie az egyik másik egyednek, vagy tételnek).* Korábban a 3.2.3 fejezetben bevezetett „*egyenértékű üzemidő*” kifejezésnél ez annyival ad többet, hogy az esetleges üzemem kívüli állapotok (egyéb leállások, K és F ciklusok) időtartama is beleszámít, mivel a közeg öregítő hatása üzemem kívül is jelen lehet.

A tönkremeneteli határállapot előtt mérhető releváns paraméterek és jelenségek

A tönkremeneteli határállapot pontos megadásakor – különösen az állapot-felügyeleti technológiáknál – ismeretesek az egyedek állapota, viselkedése, vagyis az információk a teljesítményparaméterek értékeiről. A működés során kétféle információszerzést végzünk:

- Paraméteres tönkremenetelkor a **folyamatosan figyelt paramétereken** keresztül állapítjuk meg a tönkremenetel tényét. (Pl. autógumi-abroncs barázdamélyiségének, vagy a dugattyúgyűrűknél a motor kompresszió viszonyának lecsökkenése, vagy akár a megemelkedő zajszint, vagy hőmérséklet egy csapágyazásnál stb..)
- Elképzelhető, hogy a normál üzemben nem, vagy csak hibahatár alatt mérhető, vagy szükségtelenül követendő lenne bizonyos paraméterek vezetése. Előfordulnak tehát olyan esetek, amikor a normál üzemben **nem mérendő paraméterek, előre jósolt vagy véletlen jelenségek** jelzik a közelgő tönkremeneteli határállapotot. (Pl. nyikorgó hang megjelenése, hőmérsékletemelkedés miatti színváltozás, szivárgás, téves műveleti ciklusok stb..) Ezek feljegyzése elengedhetetlen lehet az élettartam elemzések elvégzésekor.

7.5. Az igénybevételi arculat meghatározása

Az előbbiekben bevezettük az igénybevételi arculat fogalmát és az azt befolyásoló legfőbb tényezőket (6.1.3). Ezen kategóriák mentén rendszerezve keressük a későbbiekben azokat a konkrét hatásokat, beállítási paramétereket és ezek ismert vagy valószínűsíthető kombinációit, amelyeket a várható élettartam meghatározásánál, valamint változások esetén a kalkulált élettartam módosításánál számításba kell vennünk.

Ezen kategóriák:

- tervezett, funkcióhoz kötődő igénybevételek
- valószínűsíthető körülményekhez kötődő igénybevételek
- valószínűsíthető együttállásokból eredő hatások

Ezen kategóriák mindegyike közül szisztematikusan választhatók ki mindazok a jellemzők, amelyek az élettartam szempontjából kiemelt jelentőségűek, folyamatos monitorozást, és hiba esetén azonnali beavatkozásokat igénylő ún. „KO” tényezők.

7.5.1. A tervezett igénybevételek

Tervezett igénybevételnek tekinthetjük a rendszerezésünk szerint azokat a paramétereket, amelyeket mint technológiai beállításokat tartjuk számon. Ezek olyan üzemi paraméterek, amelyek a funkcióhoz kötődő igénybevételeknek tekintendők, vagy amelyeket a technológiai folyamatban szándékosan beállítanak. Esetünkben például a fluxust, a nyomásviszonyokat az egyes üzemelési szakaszokban, vagy a levegőztetés sűrűségét, erősségét, az alkalmazható koagulánsok fajtáját és mennyiségét, vagy más segédanyagokkal járó hatásokat stb. említhetnénk. Mindegyik paraméter számszerűsíthető és rendszerint in-line módon adatok nyerhetők a folyamatüzemeltetés napi gyakorlata szerint.

Felmérésükhöz, majd a későbbi adatbázisban való szerepeltetésükhöz az alábbi táblázat szolgáltat rendszerezett nyilvántartási formát.

6. táblázat Tervezett, funkciókhoz kötődő igénybevételek és hatások értékei

<i>paraméter neve</i>	<i>szűrőüzemi igénybevételek</i>	<i>visszamosási/ levegőztetési igénybevételek</i>		<i>K ciklusok körülményei</i>	<i>F ciklusok körülményei</i>
		V.mos.	Lev..		
tápvíz nyomása					
permeátum nyomása					
nyomásviszonyok időtartama					
nyomásváltozások frekvenciája					
a beadagolt hypo mennyisége					
a beadagolt O ₃ mennyisége					
beengedett levegőáram					

7.5.2. Valószínűsíthető körülményekhez kötődő igénybevételek

Ebben a kategóriában azok a paraméterek szerepelnek, amelyek az adott telepítés helyén ismert környezeti paraméterek, mint a nyersvíz hőmérséklete, vagy a szennyvízként bekerülő anyag általános és speciális tartalma, amik a középértékükkel és ingadozásjellemzőikkel is definiálható valószínűségi változók. Emellett a középértékek időbeli driftje is megismerhető

(pl. trendek, éves periodicitásuk stb.), vagyis a funkcióellátás elvárásaival együtt ezek is pontosan meghatározhatók. Megváltoztatásuk ugyanakkor gyakorlatilag nem lehetséges, vagy legalábbis nem ésszerű.

7. táblázat Valószínűsíthető, külső körülményekhez kötődő igénybevételek, hatások értékei

<i>paraméter neve</i>	<i>szűrőüzemi igénybevételek</i>	<i>Visszamosási/ levegőztetési igénybevételek</i>	<i>K ciklusok körülményei</i>	<i>F ciklusok körülményei</i>
hőmérséklet				
viszkózitás				
TSS (lebegő szilárdanyag tartalom)				
koagulánsok mennyisége				

A helyi alkalmazási sajátosságokat leíró igénybevételi arculat azonban statikus feltételeket vesz figyelembe. Az élettartam során viszont néhány elem jobban, néhány kevésbé változik, míg néhány változatlan marad, és néhányuk megszűnik. Ebből következően a fenti, adatokkal megtöltött táblázatok csak egy időszakra igazak, az élettartam során folyamatosan frissíteni kell a régiek megtartása mellett.

7.5.3. A valószínűsíthető együttállásokból eredő hatások

Vannak esetek, amikor egy paraméter kritikus tartományon kívüli értéke is problémát jelenthet, ha az más paraméterek bizonyos értékeinél együttesen jelentkeznek. Ezek együttes fennállásakor már jelentős károsodást okozó szinergiát okozhat. Az élettartam paraméterek teljes körű felmérésekor a csoport a problémásabb együttállásokat is mérje fel, így az üzemeltetési rendszert fel lehet készíteni ezen helyzetek előfordulásánál a fokozott tönkremeneteli hajlamra, valamint a karbantartási feladatok körére.

8. táblázat Valószínűsíthető együttállásból eredő káros hatások értékei

<i>együttálló paraméterek neve</i>	<i>kialakuló szűrőüzemi igénybevételek</i>	<i>kialakuló visszamosási/ levegőztetési igénybevételek</i>	<i>K ciklusoknál kialakuló körülmények</i>	<i>F ciklusoknál kialakuló körülmények</i>
első paraméter, vagy körülmény				
második paraméter, vagy körülmény				
i-edik paraméter, vagy körülmény				
n-edik paraméter, vagy körülmény				

A három elkülöníthető kategóriából szükséges kiemelni olyan paramétereket, amelyek különösen jelentős hatást okozva a rendszer azonnali leállítását, katasztrofális meghibásodását okozza. Ezeket több iparági területen is gyakran „K.O.” tényezőknek nevezik. Ezeknek a tényezőknek a körültekintő kiválasztása és nyilvántartása szükséges, állandó és lehetőség szerint (in-line) monitorozásuk jogos technológiai igény.

7.5.4. A „KO” paraméterek kijelölésének javasolt módszere

Hasonlóan az élelmiszerbiztonsági (pl. HACCP, IFS, ...) rendszereknél elvárt *Kritikus Szabályozási Pontok (CCP – Critical Control Point)* meghatározásának módszeréhez, eljárást dolgoztunk ki az élettartamot kritikusan befolyásoló paraméterek kiválasztásához. A módszer alapja, hogy logikai zárt kérdésekre adott igen/nem válaszok sorozatával egy – a HACCP elemzéseinél javasolt kérdéssorhoz hasonló – döntési fának a kérdéseit kell megválaszolni. [I. tézis] (46. ábra)

Az élettartamra gyakorolt különösen jelentős hatásuk alapján a paraméterek válogatásának/minősítésének menetét a következő pontok szerint, csoportmunkában végeztük el. Az elemzés elvégzését követően a megállapított paraméterek, mint üzemi jellemzők figyelembe vételével építettük fel az élettartam adatbázist, és üzemi jellemzői segítségével számítjuk az *egyenértékű üzemidőt*, illetve az *egyenértékű élettartamot*.

1. A paraméterek kiválasztását a csoportmunka adottságait felhasználva brainstorming vagy más csoportos ötletgyűjtő és elemzési technikákkal célszerű végezni a pontosabb és körültekintőbb műszaki tartalom érdekében.
2. Az elemzés célja a szűrőkre hatással levő paraméterek összegyűjtése az üzemeltetési folyamat mentén, figyelembe véve a helyi környezeti adottságokat és a várható igénybevételi arculatot.
3. Az élettartam szempontjából kritikus „KO” paraméterek kiválasztására kidolgoztunk egy speciális döntési fát (46. ábra), amelynek kérdéseit a csoportnak rendre fel kell tenni az összes tényezőre, amit az előző pontban összegyűjtöttek, így esély van azonos alapossággal, minden körülmény figyelembe vételével, körültekintően eljárni. Amennyiben nem kritikus paraméter adódott eredményül, az erre szolgáló adatbázisban azért meg kell teremteni a lehetőséget, hogy az ezzel a paraméterrel és esetleges hatásaival kapcsolatos információkat, tapasztalatokat feljegyezhessek. Ez azért fontos, hogy ha később a műszaki megoldásokban, vagy a feldolgozandó közegben, illetve környezeti viszonyokban beálló módosulások miatt mégis kritikussá válna, vagy más paraméterekkel szinergikus kapcsolat alakulna ki, akkor is információhoz juthassunk. Az adatbázis töltése tehát esetleges, szükség, rendkívüli esemény során adódnak bejegyzések, de probléma esetén potenciális segítséget nyújthat.
4. Amennyiben „KO” paramétert kapott eredményül a csoport, akkor jól használható formában számszerűsíteni kell. Ez vagy a természetes mértékegységében történhet (pl. adott helyen és módon mért hőmérséklet), vagy valamilyen transzformáción keresztül kapott számérték (pl. egyenértékű üzemidő), esetleg szubjektív skálán felvett érték (pl. 2-es fokozatú technológiai fegyelmetlenség).
5. Az előbbieken meghatározott számszerű paraméterek kritikusságának a határát (határait) is definiálni kell, amely(ek) átlépésekor egyértelmű nem megfelelő állapot jelenthető ki. Ezen határértékek lehetnek előre rögzített, külső elvárások (pl. jogszabályok által, vevői elvárások szerint), vagy az elfogadható tulajdonságú tisztítási

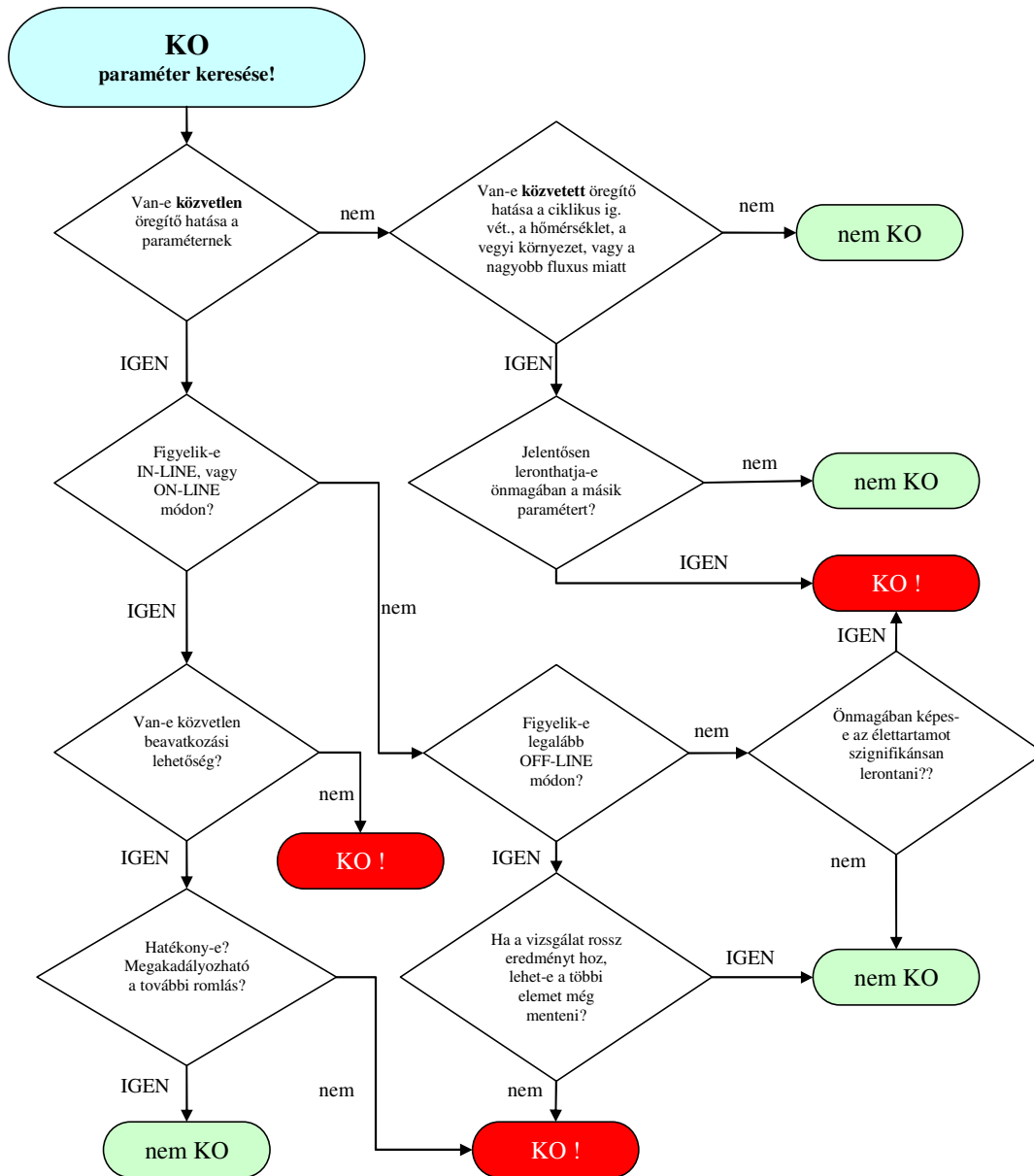
- folyamatból levezetett célérték és megengedhető ingadozási tartomány, mint beavatkozási határ.
6. Beavatkozási rutinokat kell kidolgozni minden figyelt paraméter esetére, ami azt a részletesen meghatározott és begyakorolt tevékenységsort kell, hogy jelentse, amelyet az operatív személyzetnek kell végrehajtani a határérték túllépése esetén. A fontos fizikai teendők mellett adminisztratív teendők is akadnak, amely a beavatkozások tényét, az eredmények reprodukálhatóságát, előzményeinek visszakereshetőségét szolgálják.
 7. A folyamatos információszerzés a már említett on-, in- és off-line módon előre tervezett időpontokban és mintanagysággal történhet. Az így szerzett adatokból automatikus vagy kézi idősor elemzés, esetleg SPC – a legjobban alkalmazható szabályozókartyával – jelentheti a megfelelő folyamatkövetési módszertant.
 8. Határérték-túllépés esetén a beavatkozások a kialakított eljárások szerint kell, hogy történjenek.
 9. Akár a megfelelő értékből adódó változatlan üzem, akár a beavatkozás ténye és módja is dokumentálásra kell, hogy kerüljön a megfelelő adatbázisban vagy a szabályozókartyán.
 10. A monitorozás módjának és hatékonyságának elemzése és összevetése az élettartam adatokkal szintén olyan elvárás, amelyik a csoport szakmai szempontú problémaorientált összekovácsolását segíti, viszont egyúttal lehetőséget teremt új, előnytelen tényezők felbukkanásánál a rutinszerű kezelésre.

A szervezett csoportmunkában az átalakított döntési fával a következő paramétereket választotta ki a csoport:

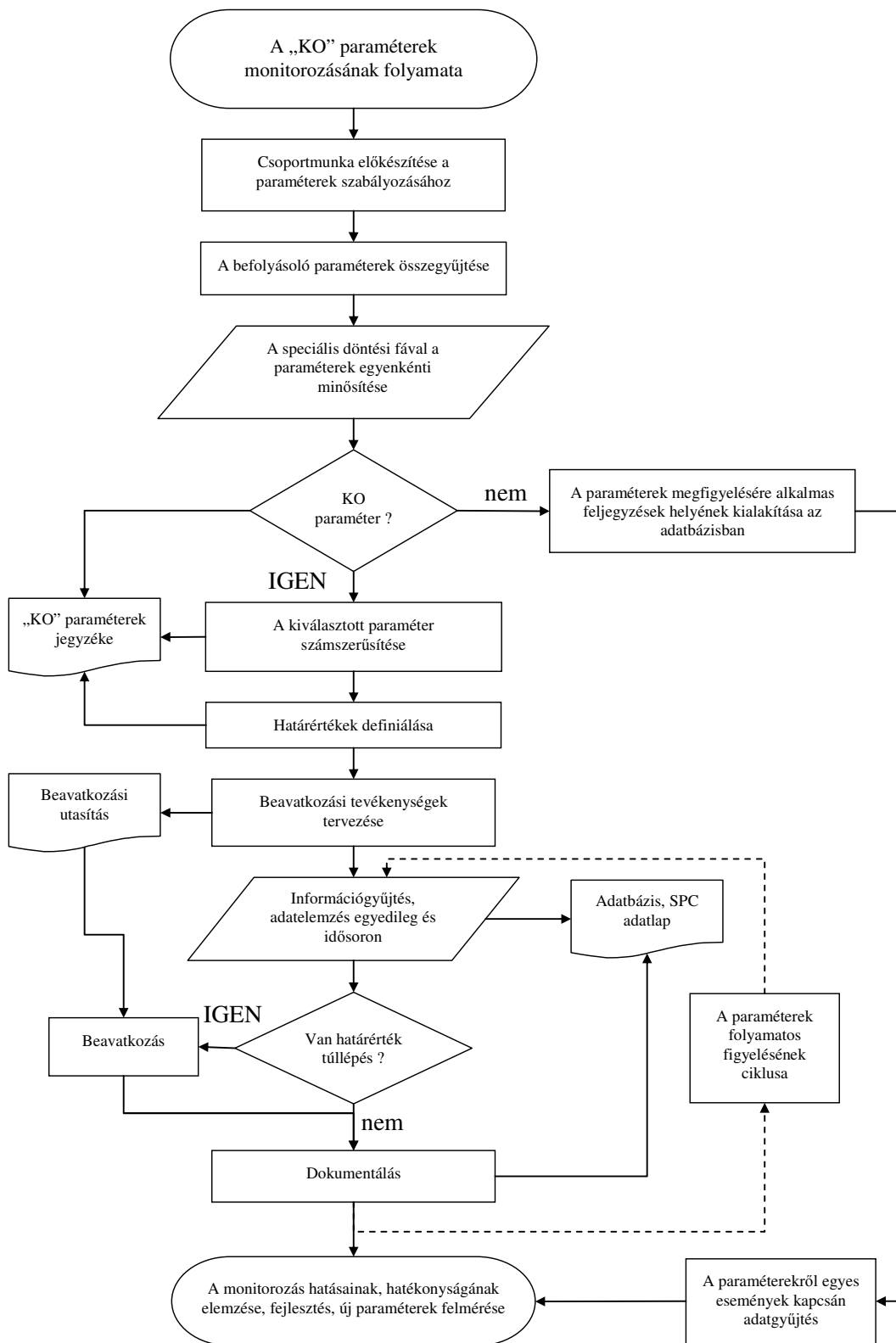
- A **nátrium-hypoklorit koncentráció** a normál üzemben és a karbantartási, felújítási ciklusokban.
- Nyomásamplitúdó – fenntartott fluxus – szabályozó rendszer alapján a szűrőt érő, leginkább **hidrodinamikai terhelés**.
- **Hőmérséklet**, és az ennek hatására alakuló viszkozitás és a káros reakciók sebessége.
- A nyersvízben levő megfelelő anyagok (leginkább a keménységet adó pl. Ca, Mg, ..., esetleg más koagulációt elősegítő anyagok) **kicsapódási hajlama**.

Ezen számszerűsített paraméterek állandó figyelése, idősoron történő vezetése, és eltérések esetén visszacsatolás, vagyis ismert rutineljárás elvégzése szükséges. A monitorozással elérhető, hogy a kimutatott szignifikáns öregítő hatások szabályozásra kerüljenek a hosszabb élettartam és a biztonságosabb üzem, valamint az előre tervezhető karbantartási beavatkozások érdekében.

A KO paraméterek monitorozásának folyamata az alábbiak szerint (47. ábra) kerülne megvalósításra:



46. ábra A „KO” paraméterek kiválasztására kidolgozott speciális döntési fa



47. ábra A „KO” paraméterek monitorozásának folyamata

8. A módszerrel nyert gyakorlati adatok elemzése

8.1. Elérendő célok az összegyűjtött élettartam adatok felhasználásával

Amint azt a korábbi fejezetekben láthattuk, a vizsgálati eredmények lényegében három területről származnak, és három eltérő típusú információt és reprezentációs minőséget hordoznak:

- Az **üzemelő telepekhez** kiszállított termékek utógondozásával szerzett információk üzemviteli jellemzőkről, élettartamokról, igénybevételi sajátosságokról és tönkremeneteli módokról szólnak. Ez az adatforrás bőséges lehet, de elég heterogén képet mutat. Egyrészt azért, mert a világ több területén adódó üzemszervezők jelentősen eltérhetnek. Másrészt az üzemeltetés során tapasztalható technológiai fegyverem is eltérő, ami az élettartam adatokon szignifikáns hatást képes kiváltani. Harmadrészt azért, mert a beérkező információk eltérősége is (mennyiségükben, struktúrájukban és megbízhatóságukban) nehezíti a kiértékelést és az általános következtetések levonását. Az információkat a helyi üzemeltetők, a táv-jeladókkal és adattovábbító egységekkel is ellátott automata készülékek, napi vagy heti e-mail-es valamint karbantartási protokollok szolgáltatják.
- A termékek tönkremenetelével összefüggésbe hozható **reklamációk** értékes információval szolgálnak, de a reprezentativitásuk kétséges. A másik két forráshoz viszonyítva nagyságrendekkel kevesebb egyedről szerzünk így tudomást. Elmondható, hogy csak a rendkívül hamar, ritkán előforduló problémákból tönkremenő egyedek jelennek meg ezeken a forrásokon. Lényegében csak minőségi információk nyerhetők a károsodások és körülményei megfigyeléséből, legtöbbször gyártási hibákra.
- A **gyári tesztelő berendezésen**, a gyártási tételek közül kiemelt reprezentatív egyedeket „öregítik”, teszik tönkre. Az adatgyűjtést részletes megfigyelésekkel, fegyvermezett technológiával, de felfokozott viszonyok (HALT, és HASS tesztek) között, a reprodukálhatóságot szem előtt tartva végzik, az öregítő vizsgálatok során. A gyártási mennyiséghez képest kis mennyiségű adatforrás, de a célzott megfigyelések és kísérletek legfontosabb színtere.

A fenti három forrásból csak kettőről, a **telepekről** és a **tesztelő berendezésről** származó adatok alkalmasak statisztikai feldolgozásra, és némiképp eltérő eloszlást mutató élettartam adatsorok adódnak. Célunk, hogy a két információforrás eredményei összerendelhetők legyenek, és leginkább, hogy az öregítőben végzett vizsgálatok alapján előre becsülhetők legyenek a tisztítótelepek élettartam adatai. [5. tézis]

Az élettartam adatbázis létrehozásával tervezhető legyenek a karbantartási és üzemeltetési beavatkozások, valamint kiindulási információkkal szolgálhassanak beruházási döntéseket megelőzően. Mindezek mellett a kvalitatív és kvantitatív adatokkal alátámasztott objektív tények felhasználásával lehetőség nyílik a terméktervezés és -fejlesztés, valamint a gyártás felé elvárásokat megfogalmazni és információkat szolgáltatni. [5. tézis]

A dolgozat egyik célja, hogy az azonos módon strukturált adatáramokból egy adatbázist hozzon létre, amely segítségével az élettartamok és azok eloszlásának sajátosságai közösen vizsgálhatók. [4. tézis] Ennek eredménye aztán lehetővé teszi, hogy az összefüggések megállapíthatóak legyenek a három forrás adatai között az alábbi elvi függvények szerint.

$$\tau_o = f(A, G, \ddot{O}), \text{ valamint } \tau_u = f(A, G, \ddot{U}) \text{ amiben}$$

τ - az élettartam, amelyet az öregítő berendezésben, valamint az üzemeltetésben tapasztalunk

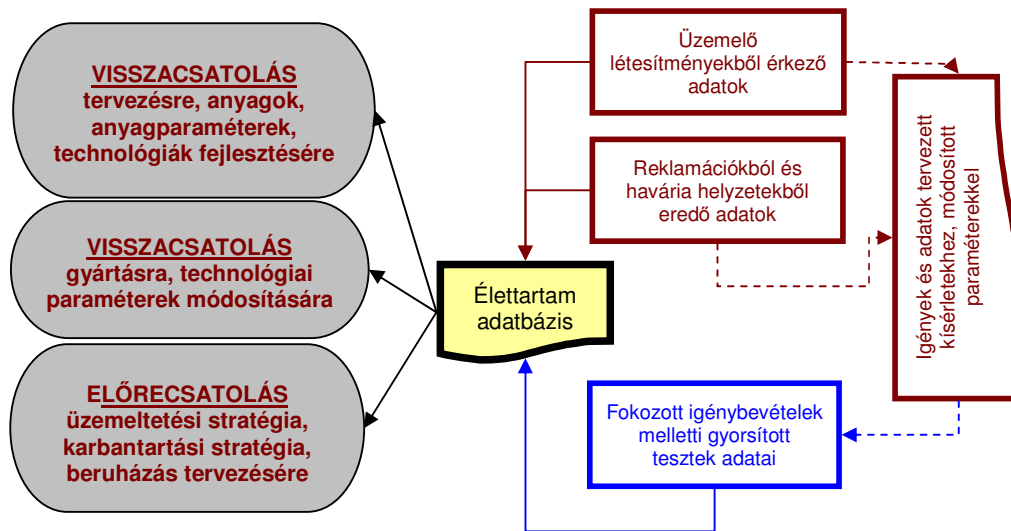
A – az alapanyag befolyásolható tulajdonságainak halmaza

G – a gyártási paraméterek és egyéb sajátosságok halmaza

\ddot{O} – az öregítő tesztberendezésen létrejövő körülmények halmaza

\ddot{U} – az üzemi területeken folyó üzemeltetések körülményeinek halmaza

A statisztikai vizsgálatok mellett optimális esetben jelentős mennyiségű szöveges információ is rendelkezésre állhat, amelyekkel a jelenség okait, következményeit, termékekkel, időszakokkal és helyszínekkel valamint gyártási változtatásokkal hozhatjuk összefüggésbe.



48. ábra Az élettartam adatbázis létrehozásának célja és környezete

A fenti ábra az információforrások rendszerét és az adatbázis felhasználásának lehetőségeit ábrázolja.

8.2. Élettartam adatbázis modell kialakítása, tervezett tartalma és használatának feltételei szennyvíztisztító membránszűrőknél

A vizsgálatok alapjául szolgáló üreges membránokról eddig gyűjtött és nem gyűjtött információk az élettartam adatok utáni elvárások valamennyi említett igényét felveti az adatbázis kialakítására.

Munkánk során nem újszerű statisztikai kiértékelő programot, nem matematikai formulákat dolgoznánk ki, – hisz ezek több szakmában is közismertek, – hanem az adatok kezelésének gyakorlati módszerét úgy valósítanánk meg, hogy időben változó adatigényt legyen képes kielégíteni. Mindemellett az alaposabb élettartam-elemzések megvalósítása érdekében újszerű

információkat kell feldolgozni, valamint az adatokon a pontos összemérhetőséget lehetővé tevő konverziókat kell megvalósítani. [4. tézis]

A legnehezebb feladat egy ilyen adatbázis modellel kapcsolatban, hogy olyan adatok feldolgozására is felkészítsék, amelyek a készítés pillanatában esetleg még nem ismertek, de amelyekre legalábbis jelenleg még nincs igény. Hogy ez a feldolgozás a jövőben elvégezhető legyen, az alapjául szolgáló adatokat a jelenben kell megszerezniük, tehát a módszer legyen képes azok felismerésére és későbbi fogadására. Az adatbázist úgy alakítottuk ki, hogy fejleszthető módon fogadja be az alábbi információ fajtákat:

- a létesítmény helyszínén belül a blokk, a kazetta és azon belül az adott beszerelési pozícióban levő moduljának hely, típus és széria azonosítói;
- beszerelési és/vagy kiszállítási időpontok;
- az üzemeltetés számszerű adatokkal leírható jellemzői
- az egyenértékű működési idő meghatározására használt faktorok
- beavatkozások ténye nem számszerű adatok formájában

Hogy az adatok időben és hatékonyan követhessék a változó körülményeket és benne a cserélődő objektumokat, nem egy statikus gyűjtési és rendszerező táblázatként, hanem dinamikus változó cellákkal és ciklusonként újraszámolt jellemzőkkel működő adatbázisként kívánjuk működtetni, ami informatikus és adatbázisok létrehozásában jártas szakember közreműködését is igényli a jövőben. A jelenlegi, Excel alapon működő megoldás csak a tartalmat és a számítási módszert képes bemutatni, az informatikai adottságokhoz igazodó magasabb szintű továbblépés elengedhetetlen.

A kísérleti jelleggel működtetett adatbázis feltétele, hogy:

- A telepítéskor vagy az esetleges cserék alkalmával beépített modulok pontos azonosítása megtörténhessen blokk, kazetta, beszerelési pozíció, valamint időpontok pontos feltüntetésével.
- Az erre alkalmas telephelyről (vagy a gyári teszt berendezésből) in-line módon érkezzenek üzemi adatok a modulokat befogadó közegek fizikai-kémiai állapotjelzőiről.
- A beérkező adatok valós időben bekerüljenek az adatbázis feldolgozását végző számítógépbe, és a megadott ciklusidő szerint legyenek frissítve.
- A változások és beavatkozások valós időben be legyenek vezetve az adatbázisba.
- Ha technikailag lehetséges, az egyes megfigyelési időszakok aktuális adatai archiválásra kerüljenek.

Mindezen tényezőket feltételezve alakítottuk ki az elemzés alapjául szolgáló adatbázist. Az adatbázis működtetésével megvalósítható funkciók a következők:

A kiszállított szűrőmodulok egyértelmű azonosítása, létesítményhez rendelése. Lehetőség van egy adott tétel egyedei sorsának kigyűjtésére, korábbi beavatkozások hatásainak tanulmányozására, valamint belőlük az élettartam elemzések és karbantartási tennivalók tervezésére.

Akár modulokra bontva megvalósulhat az aktuálisan in-line módon figyelt üzemi jellemzők rögzítése, valamint felhasználása. Amennyiben a hatékony archiválás is megoldódik, az üzemi adatok visszakereshetők, idősoron elemezhetők és akár statisztikai folyamatszabályozással is követhetők. Bizonyos esetekben és szűrések alkalmazásával az üzemi jellemzők közötti összefüggések is egyszerűen elemezhetők

Az előzőekben említett üzemi jellemzőkből képzett faktorokkal (mint élettartamot befolyásoló, többnyire „KO” tényezőkkel) automatikusan számítható az egyenértékű üzemidő. A módszerből fakadóan újabb számszerű üzemelési adatok figyelésével újabb faktorok is beépíthetők a rendszerbe. [1. tézis]

Szintén a megoldott archiválás esetén a nem számszerűen, hanem szavakkal megfogalmazott tapasztalatok (pl. tönkremeneteli módok), üzem közbeni események és észlelések a későbbiekben elérhetők és felhasználhatók.

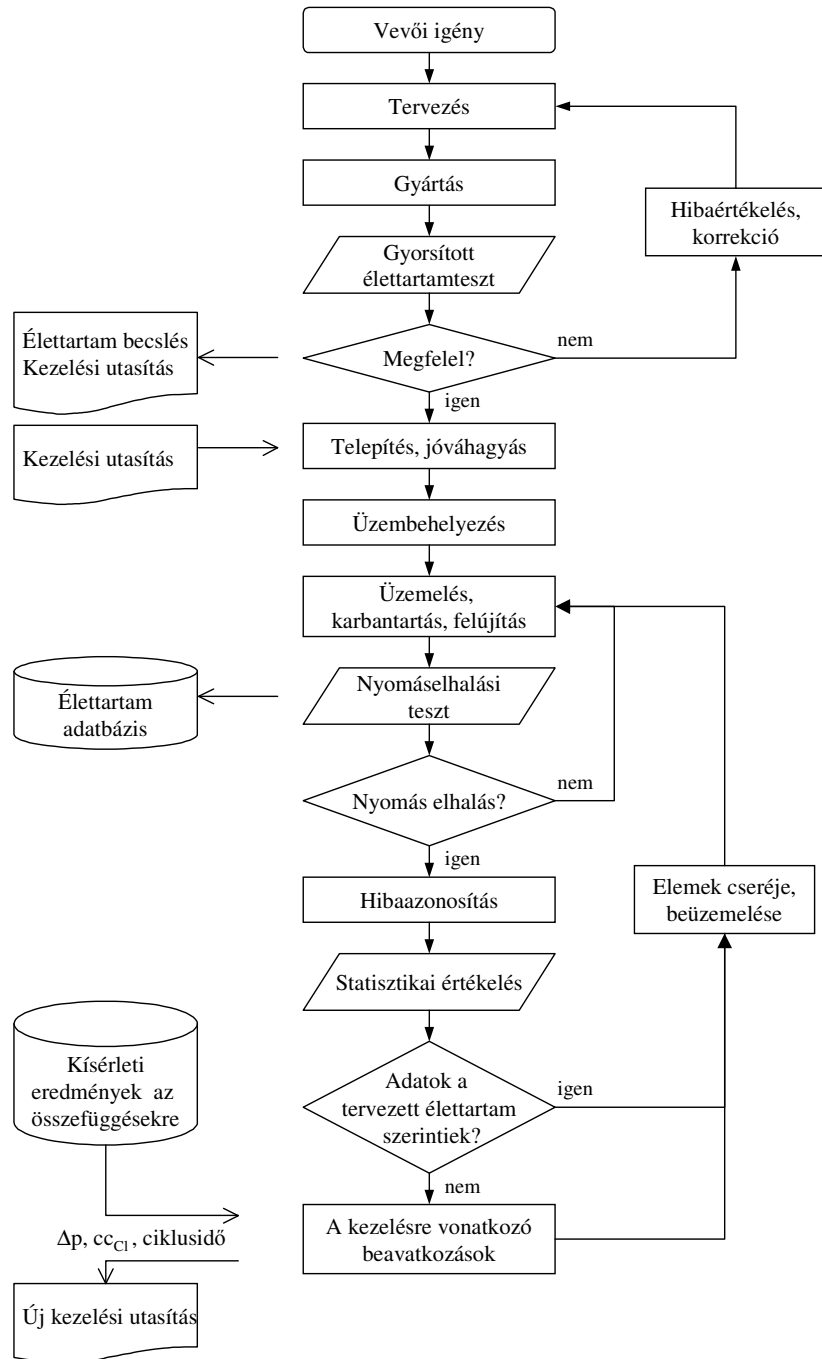
8.3. A élettartam értékelések alapján történő műszaki és minőségügyi szabályozás

A kidolgozott adatbázis-struktúra alapján folyamatosan vezethető a termékekre vonatkozó Weibull-elemzés. A kapott élettartam-statisztikák alkalmasak arra, hogy a beavatkozások alapjául szolgáljon. A szabályozás logikája a hagyományostól lényegesen eltér, mivel nem fizikai jelre vonatkozóan történik, hanem statisztikai elemzések során kapott elvont objektumokra. A szabályozás sajátossága, hogy a Weibull-hálón kapott élettartam görbe jellegzetes meredekségeit és határpontjait használja vonatkoztatási alapul. Ehhez a gyorsított és a korábbi tapasztalatok alapján elvárásokat határozzunk meg. Az ezektől való eltérés generálja a beavatkozást.

Mivel a beavatkozások közül a terméktervezés és a gyártás folyamata magas szinten szabályozott, ezek szabályozását a validálási eredmények és a gyártási folyamatstatisztikák alapján végezzük. A kapott élettartam adatok leghatékonyabb felhasználását az üzemi karbantartás területén látják indokoltnak a témát befogadó cég szakemberei. Ezért a szabályozási kört itt célszerű kialakítani.

Az élettartam statisztikák alapján az egyes termékekre kidolgozott karbantartási és kezelési rendeket érdemes módosítani. Ezek átalakítása befolyást gyakorol a későbbi élettartam adatokra. A szabályozás lényege, hogy a tervezett alakú élettartam görbe fenntartása valósuljon meg. A lehetséges beavatkozások a tisztítási és karbantartási ciklusidők és klórkoncentrációk, a nyomáshatárok, a levegőztetési körülmények módosításai lehetnek. A beavatkozások határhelyzetére és stratégiájára az adatbázis kellő feltöltöttsége esetén célszerű kísérlettervet készíteni.

A szabályozás minőségügyi vonatkozásait az alábbi folyamatábra, mint eljárási rend jól szemlélteti.



49. ábra Eljárasi rend a kezelési és karbantartási folyamat szabályozására

8.4. A kialakított adatbázis felépítése

Az adatbázis kialakításánál elsőként a vezetendő adatok kategóriáit kellett meghatározni. A kategorizáláskor is többféle csoport különült el. Ezek általánosságban úgy nevezhetők meg, mint *adatok* és *változók*. Az adatok az adatbázisba kerülést követően nem változnak, legtöbbször azonosításra és események időpontjainak, valamint események rögzítésére

szolgálnak. A változók fizikai állapotjelzőket, képzett számértékeket, tényleges vagy számított időtartamokat mutatnak. Az alábbi két típusba (adatok és változók) tapasztalatunk szerint besorolhatók az adatbázis elemei, további pontosítások mellett.

8.4.1. Az adatbázis által vezetett ADATOK és kezeléseik

A következőkben a mellékelt táblázat fejléce szerint ismertetésre kerülnek az adatbázisban rögzített információk a működtetéskor elvárható funkciók és működési rutinok megadása mellett. Ezek alapján elkészíthető lesz egy nagyobb adatmennyiséget is gyorsan és hatékonyan kezelni képes specifikált program, vagy fájl (50. ábra). Elsőként **ADATOK** megadása szükséges, melyek a definícióink szerint az alábbi általános kategóriákba sorolhatók:

Állandó adat, ami a felhasználási, esetleg gyártási helyszín azonosítására szolgál. Ezen helyszínek befogadják, működtetik, elhasználgják a szűrőelemeket, vagyis fluktuáló egyedek esetén is állandó környezet képeznek. Az adatbázisban betöltött szerepük is egy regiszterekkel ellátott dobozhoz hasonlít, amiben cserélődő tárgyakat tárolhatunk.

Modulhoz köthető zárt adatok azok, amelyek egy modul létrehozásának, beszerelésének azonosítását teszik lehetővé, vagyis az adatbázisban megjelenő modulok esetén már változatlanok (pl. szériaszám, be- és kiszerezési időpontok)

Modulhoz köthető nyitott adat, amelyik változó adattartalommal köthető egy egyedhez. Hozzáírható, részletekben is változtatható, de beírás után a legtöbbször változatlanul marad az adatbázisban. Amennyiben nem csak az adott modulhoz kapcsolható információt rejti, gyakori, hogy hivatkozásokkal más moduloknál is megjelenik.

tipus	kazetta azonosító	pozíció	törökmeneteli időpontja	beszerelés időpontja	átlagos Δp	"q1" faktor	"q2" faktor	"v" faktor	hőmérséklet	kiörlés	"T-C" faktor	kiörlési hajlam (víc-lágysági fok)	megfigyelési időszak hossza	egyenértékű működési idő	egyenértékű élettartam	megjegyzés 1	megjegyzés 2
type 1	AB13HGTR231	A1	2004.02.01	2002.01.30													
type 1	AB13HGTR231	A2	2004.02.01	2002.01.30													
type 1	AB13HGTR231	A3	2007.11.02	2002.01.30													
type 1	AB13HGTR231	A4	2004.02.01	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A5	2004.02.01	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A6	2004.02.01	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A7	2004.02.01	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A8	2004.02.01	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A9	2004.02.01	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A10	2004.02.01	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A11	2004.02.01	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A12	2004.02.01	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A13	2004.02.01	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A14	2004.02.01	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A15	2004.07.31	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A16	2004.07.31	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A17	2004.07.31	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A18	2004.07.31	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A19	2007.11.02	2002.02.03													
type 1	AB13HGTR231	A20	2007.11.02	2002.02.03													
type 2	AB13HGTR231	A21	2004.02.01	2002.02.04													
type 2	AB13HGTR231	A22	2004.02.01	2002.02.04													
type 2	AB13HGTR231	A23	2004.02.01	2002.02.04													
type 2	AB13HGTR231	A24	2004.02.01	2002.02.04													
type 2	AB13HGTR231	A25	2004.02.01	2002.02.04													
type 2	AB13HGTR231	A26	2004.07.31	2002.02.04													
type 2	AB13HGTR231	A27	2004.07.31	2002.02.04													
type 2	AB13HGTR231	A28	2004.07.31	2002.02.04													
type 2	AB13HGTR231	A29	2007.11.02	2002.02.04													
type 2	AB13HGTR231	A30	2007.11.02	2002.02.04													

50. ábra Az élettartam adatbázis tartalma, az adatok és változók megjelenése

Az általános kategóriákban az alábbiakban ismertetésre kerülő *adatok* kerülnek rögzítésre, vezetésre.

Típus

A típus olyan *modulhoz kötődő adat*, ami azonosítja a beszerelt szűrőmodul típusát, amely a gyártási tételt is ismertté teszi. A modulhoz kötődő információ, amin később nem lehet változtatni. Új szűrőmodul beszereléskor elegendő ezt az információt átírni, hogy az egész sorból a régi egyed adatai az aktív táblázatból töröljendők, a számítások nullázódjanak,

miközben a megállapított élettartam az adatbázis egy másik felületén egyszerűsített formában kerüljön a „véglegesen” megőrzendő, vagy adott idő elteltével „felejthető” státuszba.

Kazetta azonosító

A kazetta azonosító egy *állandó adat*, amely azonosítja a szennyvíztisztító telepet, azon belül a blokkot és a kazettát. Az Excelen vezetett adatbázisban ez egy olyan adat, amely gyakorlatilag állandó része akár az üres táblázatnak is, hiszen helyszínt azonosít és várja a beleszerelt objektumok megjelenését az adatbázisban.

Pozíció

A pozíció megadásával a beszerelt modulnak a kazettán belüli elhelyezkedését adjuk meg, mint *állandó adat*. Szintén a táblázat strukturálisan változatlan részéhez tartozik. A kazetta-azonosítótól való elkülönítésével a későbbi adat-visszakeresést kívántuk egyszerűbbé tenni. Pontosabb ismerete azért is fontos, hogy egy esetleges tönkremeneteli vagy egyéb módon jelentkező anomália esetén lokalizálni lehessen a nagyobb előfordulási gyakoriságot, vagy egyéb hatásokat/következményeket.

Tönkremenetel időpontja

A tönkremenetel időpontja adja meg, hogy az üzemi jellemzők, vagy a karbantartók jelzése alapján mikor jelentették hibásnak az adott modult. *Modulhoz kötődő zárt adat*, vagyis az adat és az objektum a beírás pillanatától kezdődően elválaszthatatlan egymástól. A táblázat automatikus szolgáltatásaihoz tartozik, hogy a cella kitöltésekor az „*egyenértékű működési idő*” cella értékét a program hozzáadja az addig kumulálódó „*egyenértékű élettartam*” cellához, majd a megfelelő jogosultság nélkül letiltja a további módosítás lehetőségét.

Beszerelés időpontja

A beszerelés időpontja annak a dátumnak a beírását várja el, amikor a modul érintkezni kezd az élettartamát meghatározó közeggel (legtöbbször a beszerelés), vagyis kezdetét veszi a kumulálódó hatások szerkezetkárosítása. Szintén a *modulhoz kötődő zárt adat*.

A következő tartományok az azonosított és folyamatosan in-line módon figyelt állapotjelzők a szűrőket érő károsító hatások szintjét és azok számításokban felhasználható, faktorként transzformált értékét tartalmazzák. Az adatbázis ezen része egyszerűen fejleszthető újabb tényező-faktor párosok meghatározásával és beillesztésével, valamint az élettartamot számító függvények aktualizálásával.

8.4.2. Az adatbázis által vezetett VÁLTOZÓK és kezelésük

Az adatokat követően a **változókat** kell tudni aktualizálni, egy megfigyelési ciklus szerint átlagolni, vezetni és felhasználni, melyek a definícióink szerint az alábbi általános kategóriákba sorolhatók. A *megfigyelési időszak hosszát* a kísérleti időszakban 7 napra állítottuk be. Amennyiben a körülményekben különleges változás nem áll be, a ciklusidő marad ezen értéken. Amennyiben az egyes időpontokban tapasztalható lokális értékek az egyhetes átlagolással kapott értékekhez hasonlóak, nem szükséges megváltoztatni az automatikusan beálló *megfigyelési időszak hosszát*. Rendkívüli esetekben, mint például nagy esőzések, vagy egy hirtelen felmelegedést követően felerősödő hóolvadás során szükség lehet rövidebb átlagolási időszak beállítására, hogy az átlagolással ne „kenődjenek” el a fokozott élettartam jellemzők károsító hatásai. Ilyenkor az operátor beavatkozásával megadható rövidebb *megfigyelési időszak* is.

Abszolút változó, amely lényegét tekintve változásban van, viszont a teljes rendszertől függetlenül alakul. Ilyen például az állandóan haladó (naptári) idő. Önmagában is alkalmazható élettartam meghatározáshoz, de az egyenértékűség szempontjából konverzióra szorul.

Üzemi változók, amelyek abszolút fizikai/kémiai jellemzők természetes dimenziójú értékei. Szabályozással szinten tartott, vagy passzív módon tapasztalt, esetleg befolyásolhatatlan jellemzők. Az in-line módon szerzett adatok a gép által megadott ciklus szerint átlagolódnak, és egy megfigyelési időszakban ezek átlagolt értéke lesz a későbbi számítások alapja. Más csatornán szerzett adatoknál az adatbázist kezelő szakembernek kell azokat aktualizálni.

Generált változó, ami valójában külső és belső körülmények alapján alakuló matematikai „faktor”, amelyet számértékek (esetünkben az üzemidő) módosítására szánunk. Legtöbbször a hozzá tartozó üzemi változó kategorizálásával, intervallumba sorolásával algoritmusok szerint generálódik.

A modulhoz tartozó kumulált változó olyan érték, amely időről időre az előző időszakban számítottakhoz hozzá kalkulálja a jelen időszak értékeit. Az így adódó eredmény azonban csak egy adott modulhoz tartozik.

Az általános kategóriák szerint az alkalmazás jelenleg az alábbi *változókat* fogadná be és kezelné:

Megfigyelési időszak hossza

Bár a táblázat szerkezetét tekintve ez egy később beillesztett oszlop, az üzemi és a generált változók számítása egyaránt igénylik e cella, mint *abszolút változó* tartalmát.

A cella az előző időszak lezárása után eltelt naptári időt mutatja, és vagy az időszak végével nullázódik automatikusan, vagy kézi beavatkozás eredményeként.

Az átlagolási időszakok hossza az adatbázis működését megadó, a feljogosított kezelő által változtatható paraméter. Ennek definiálásával ilyen időtartamban végzik az egyes üzemi változók rutinjai az átlagolást.

Ha a szűrőlétesítmény viszonylag eseménymentes időszakban üzemel, elegendő a beérkező adatokat 7 napos ciklusidővel kiértékelni és átlagos értéket kalkulálni. Amennyiben valamilyen rendkívüli (pl. időjárás) esemény megváltoztatott üzemviteli jellemzőket igényel, az akció kezdeténél célszerű lezárni az előző megfigyelési időszakot, és új időponttal kezdeni a folyamatosan érkező adatok átlagolását. Ekkor vagy az előre megadott rövidebb ciklus végével, automatikusan indul a lezárás és az újra integrálás, vagy ismét kézi beavatkozással kezdetünk új időszakot a rendkívüli helyzet normalizálását követően.

A lezáráskor kijelzett *megfigyelési időszak hossza* elnevezésű időtartamot szorozza a program az adott modult jellemző (ϕ ; T-CI; h; ...) faktorok értékével, ezáltal kapjuk eredményül az *egyenértékű működési időt*.

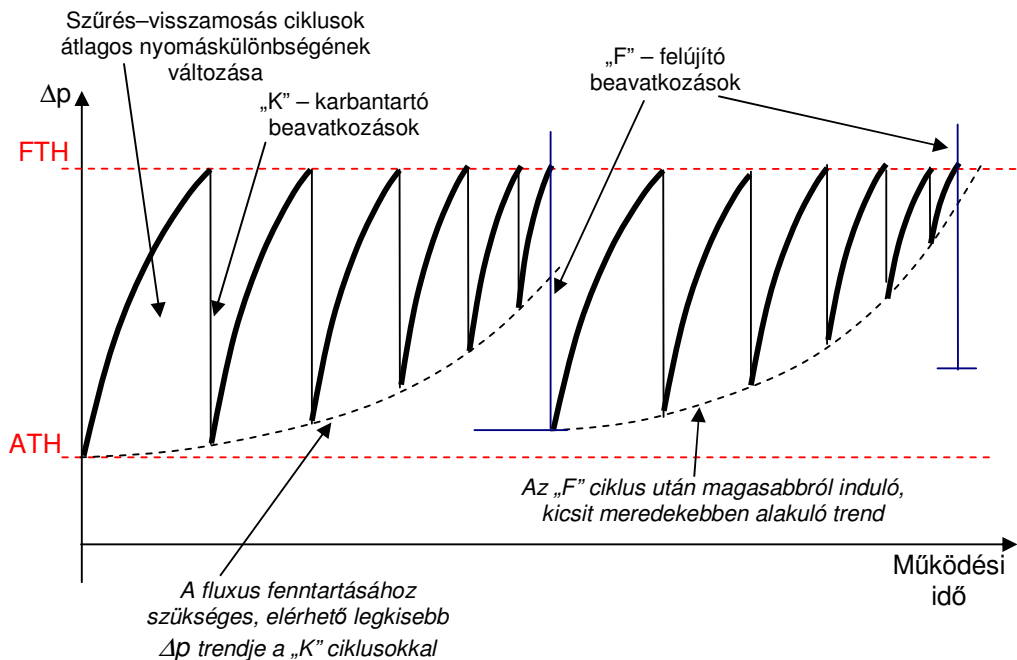
A lezárás további eredménye, hogy a program utasítást ad, hogy az *egyenértékű működési időt* adja hozzá az addig ismert *egyenértékű élettartam* elnevezésű kumulált változó értékéhez.

Végző tönkremenetel esetén több cella tartalma is automatikusan változik, amit később, az *egyenértékű élettartamról* szóló bekezdésben ismertetünk.

Szűrőterhelés

A túlnyomórészt hidrodinamikai – de bizonyos eseteknél hidrosztatikai – terhelés számértékét megfeleltetjük a szűrőn „átkényszerített” fluxussal. A terhelés legfontosabb összetevője a folyadékáram palástra gyakorolt nyomása, amely a szűrő anyagán lassan kialakuló mélységi eltömődés miatt jön létre. A membrán palástján felépülő szűrőlepleny komoly ellenállást képes kifejteni. Ennek eltávolítása a visszamosások alkalmával rendszeresen visszacsökkenti a szűrő palástjára ható terhelést. Hosszabb időtávon viszont a lebegőanyagból a pórusokba jutó részecskék molekulái másodrendű kötésekkel képesek tapadni a pórus belső felületéhez, így az leszűkül, megváltozik a hidrofil tulajdonsága, és ebből következően az új összetételű felület és a nyersvíz közti felületi feszültség. Ezen mechanizmus miatt a membrán nagyobb nyomáskülönbséget igényel az azonos fluxus biztosítására a folyadékfázis átpréseléséhez. A fluxus csak a nyersvíz és a permeátum oldal közti nyomáskülönbség emelésével valósítható meg. A túl nagy különbség viszont terhelésnövekedést okoz a membrán szerkezetére és anyagára, ami a tönkremenetel határállapotát közelebb hozza.

Mindebből következően a szűrőre az életkora szerint a gyártó ajánlásokat ad a megengedhető nyomáskülönbségre. Az adatbázisban ez a *változó* az in-line módon érkező adatok integrálásán keresztül, vagy más forrásból kapott adatok – esetleg kézi bevitellel – időszakra vonatkozó értékeinek átlagolásával, csúszó átlagolásával mutatja a szivattyúk által aktuálisan fenntartott, az időszakra jellemző átlagos nyomáskülönbséget. Az adatbázisba kerülő nyomáskülönbség értéket a beérkező nyomásértékek alapján további átlagolással számítja a számítógép.



51. ábra A megengedhető nyomáskülönbség változása a használati idő előrehaladtával az élettartam vége felé

„ ϕ ” faktor

Szükséges egy olyan szorzótényező, amely az üzemi fluxus fenntartásához a megfigyelési időszakban alkalmazott nyomáskülönbség alapján számszerűsíti az élettartamot befolyásoló hidrodinamikai terhelést. A nyomásváltozások miatti terheléseknek azonban két fajtájuk van.

Az egyik a szűrészüzei nyomáskülönbség miatt, míg a másik a visszamosáskor létrehozott visszaáramlási nyomás miatt alakul ki. Ezen hatások kombinációját két azonos tartalmú faktor szorzásával érvényesíthetjük a hidrodinamikai terhelés meghatározásakor.

A nyomásadatok alapján az átlagolt értékeket az alkalmazás intervallumba sorolással dolgozni fel a továbbiakban. Az alábbi kategóriák szerint kapnánk meg a „ ϕ_1 ” és „ ϕ_2 ” faktorokat, és az ebből számított „ ϕ ” generált változót. A besorolást a következő táblázatok szerint generálnák az algoritmusok.

9. táblázat Az üzemi nyomáskülönbséget értékelő „ ϕ_1 ” faktor

„ ϕ_1 ” faktor [-]	Δp - a nyomáskülönbség kategóriái ¹⁴ [Pa]
1	$\Delta p < \dots$
1,01-.....
1,04-.....
1,09-.....
1,2 < Δp

10. táblázat A tisztítási nyomáskülönbséget értékelő „ ϕ_2 ” faktor

„ ϕ_2 ” faktor [-]	Δp - a visszamosás ellentétes nyomásának kategóriái ¹⁵ [Pa]
1	$\Delta p = 0$ (csak levegőztetés)
1,005-.....
1,01-.....
1,13-.....
1,16 < Δp

A „ ϕ ” faktor meghatározása a fenti értékekből tehát:

$$\phi = \phi_1 \cdot \phi_2 \quad [-] \quad \{36\}$$

Hőmérséklet

A hőmérséklet három ponton is fokozza a szűrőanyag károsodását, ezért külön tényezőként kívánjuk bevezetni az egyenértékű működési idő meghatározásába. A hőmérséklet a szürendő nyersvíz közeg hőmérsékletét jelenti, hiszen a létesítmény a szabadban, nem szabályozható módon kerül elhelyezésre. Ipari szűrési eljárásoknál zárt helyen kerül elhelyezésre, kisebb

¹⁴ Az alkalmazott nyomáskülönbség értékek közléséhez a dolgozatot befogadó cég nem járult hozzá.

¹⁵ Az alkalmazott nyomáskülönbség értékek közléséhez a dolgozatot befogadó cég nem járult hozzá.

szűrési kapacitást kell biztosítani, így a technológia által szabályozott az áramló közeg hőmérséklete.

- Egyrészt a polimerek magasabb hőmérsékleten nagyobb mechanikai kúszást szenvednek nagyobb fluxus alkalmazásakor, ami a szűrőképességet rontja, és a mélységi eltömődések kialakulását gyakorítja. Mivel a szűrők hordozó anyaga a mechanikai terhelést tekintve jelentősen túlméretezett, és a kis keresztirányú méret még nagy nyomásokon sem okoz nagy felületi erőket, gyakorlati értelemben ez a hatás elhanyagolható. [35]
- Magasabb hőmérsékleten a kémiai reakciók sebessége – és természetesen a degradációval összefüggő reakcióké is – általánosan nagyobb. Az Arrhenius szabály szerint 10-15°C-onként átlagosan megkétszereződik.[35]
- Ezzel ellentétben a víz viszkozitása változásának a hatása (37. ábra), mivel az a kisebb hőmérsékletek esetén növeli meg az áramoltatott közeg szűrőre gyakorolt károsításának mértékét.

Az adott szűrő környezetében elhelyezett hőmérsékleti jeladók szolgáltatják ezt az üzemi változót, amit a mintavételezés és az átlagolás sűrűségének megfelelően az adatbázis ezen rekesze megjelenít. A megfigyelési időszakon belül értéke már nem változik, a program a faktort ez alapján kalkulálja.

A viszkozitás–hőmérséklet–klórterhelés hatás hármas élettartam módosító mértékét majd a „*T-CI*” kombinált faktor veszi figyelembe.

Klórterhelés

A klór koncentrációját szintén távérzékelőkkel lehet a számítógépbe és az adatbázisba juttatni. A klór káros hatását a polimer szűrőanyag szerkezetére fejt ki, amely károsodás a molekulaszervezet roncsolódása miatt halmozódni képes.

A közeg klórtartalma a kezelés funkcióját tekintve kétféle lehet.

- Tisztítási üzemben (élővízbe való visszaengedéskor, ivóvíz hálózatba való betápláláskor) nem, vagy csak minimális mennyiségű klórt alkalmaznak, így az nem jelent különösebb terhelést, de az élettartam klórterhelésbe kis mennyiségben beszámítandó.
- A karbantartást szolgáló K és F kezelési ciklusok esetén viszont jelentős mennyiségű klórt adagolnak a közegbe, amely hőmérsékletének emelésével magasabb tisztítási hatékonyság érhető el. Ekkor azonban nem áramlik a közeg, tehát a viszkozitás változás nem okoz problémát.

Mіндеzen tényezők (hőmérséklet, viszkozitás, klórkoncentráció, üzemmód) együttes kezelését egy kombinált faktor meghatározásán keresztül veszi figyelembe az adatbázis.

„T-CI” kombinált faktor

A hőmérséklet–klórterhelés hatáseggyüttes figyelembe vételével üzemeltetési tapasztalatok és a laborokban végzett vizsgálatok alapján a szakértői csoport véleményei átlagolásából kiindulva a „*T-CI*” faktorokat a következőkben állapítottuk meg.

11. táblázat A hőmérsékletet, a viszkozitást és a klórterhelést értékelő kombinált „T-Cl” faktor értékei [-]

<i>hőmérséklet</i>	<i>áramló közeg</i>		<i>álló közeg</i>	
	<i>klórmentes nyersvízben (0 ppm)</i>	<i>kis klórtartalmú nyersvízben (1 ppm)</i>	<i>K beavatkozások (500 ppm)</i>	<i>F beavatkozások (1000 ppm)</i>
T < 5⁰C	1,06	1,08	3	3,5
5⁰C – 10⁰C	1,02	1,04	3,5	4
10⁰C – 20⁰C	1	1	4	4,8
20⁰C – 30⁰C	1	1,05	4,5	5,5
T > 30⁰C	1	1,1	5	6,5

Az adatbázis a hőmérséklet, valamint a klór koncentrációját érzékelő távadók jeleinek besorolása alapján a fenti mátrix szerint állapítja meg a kombinált faktor értékét.

A kicsapódási hajlam foka

A többi üzemi változóhoz hasonlóan a víz iontartalma is megvalósítható in-line mérési eljárással, így a számítógép aktuális adatokkal frissülhet. Mivel a kemény vízből a vízkőképződés is károsítja a szűrőmembránt, és a kumulálódó hatása folytán rövidíti az élettartamát, „KO” tényezőként kell figyelembe venni az egyenértékű élettartam számításánál. Az adatbázis az előző üzemi változókhoz hasonlóan a megfigyelési időszakon belüli átlagolással számít egy alapul szolgáló átlagos értéket.

„h” faktor

Az adatbázis a kicsapódás hajlamot jelenleg – in-line módon – csak a víz keménységéről felvett mérési adatokkal, az alábbi táblázat alapján sorolja be, és rendel melléjük szorzó tényezőt, a „h” faktort.

12. táblázat A kicsapódási potenciált értékelő „h” faktor

<i>„h” faktor [-]</i>	<i>vízkeménység [⁰dH]</i>
1	H < 10
1,4	10 – 15
1,8	H > 15

Egyenértékű működési idő

Ez egy generált változó, amely az alábbi összefüggés szerint számítja és jelzi ki a tényleges időtartamból (*t*) az összevethetőséget segítő, a halmozott károsodások mértékét jelző képzetes működési időt (*t_{ei}*) az üzemi változók frissítésének ciklusideje szerint.

$$t_{ei} = t \cdot \Phi \cdot TC/ \cdot h \quad [\text{h}] \quad \{37\}$$

Egyenértékű élettartam

Az *egyenértékű működési idők* összegzésével kapjuk azt a képzetes időtartamot, ami a termékegyednél az azonosnak feltételezett károsító hatások alatt a teljes tönkremenetelig elszenvedett mennyiséget jelenti. Ez egy *modulhoz tartozó kumulált változó*.

$$\tau_e = \sum_{i=1}^n t_{e_i} \quad [\text{h}] \quad \{38\}$$

behelyettesítve a {37} összefüggést

$$\tau_e = \sum_{i=1}^n t_i \cdot \Phi_i \cdot TCl_i \cdot h_i \quad [\text{h}] \quad \{39\}$$

Az egyértelműség érdekében a dolgozatban a „működési idő” kifejezés a működésben levő egyedekre használatos, míg a tönkremenetelt követően már az „élettartam” kifejezést használjuk. Ebből következően a cellában akkor jelenik meg érték, ha az *adatok* tartományában beírták a *tönkremenetel időpontját*.

Tönkremenetel esetén az adatbázis *adatok* tartományába beírásra kerül a *tönkremenetel időpontja*, ami automatikusan lezárja a megfigyelési időszakot és így a *megfigyelési időszak hossza* nevű cellát. Ez utóbbi a cella utolsó adatának felhasználását követően felülíródik a *beszerelés időpontja* és a *tönkremenetel időpontja* között eltelt tényleges naptári időtartam értékével.

8.4.3. Az adatbázis által kezelt „MEGJEGYZÉSEK”

A több éves működtetés során adódnak helyzetek, amikor jelentős, az élettartamot befolyásoló változások következnek be a működtetésben vagy a létesítmény műszaki kialakításában. Ezeket nem lehet számszerű adatokkal megadni, csupán lejegyezni. Számításokban ugyan nem használjuk fel, viszont az adatbázis egyik célját jelentő termékfejlesztéshez, illetve a karbantartási ütemterv és tevékenységek tervezéséhez, fejlesztéséhez elengedhetetlenek.

Az adatbázisban helyet adó rekeszben időpontként elkülönítve és időpontokkal megcímezve kerülnek rögzítésre ezek a megjegyzések. Mindezek biztosítják, hogy ez a *modulhoz tartozó nyitott adat* gyűjthető, visszakereshető legyen.

A későbbi használat során elképzelhető az a felhasználói igény, hogy ne egy cellába, hanem a tartalom logikai különbözősége miatt két vagy több cellába is el lehessen helyezni megjegyzéseket.

A tönkremenetel bekövetkezésekor a cella elvárja, hogy a kezelő beírja a tönkremenetelt kiváltó okot, mechanizmust.

Amennyiben új modul kerül beszerelésre az adott kazetta adott pozíciójában, a megjegyzések rekeszei egy archivált adatokat gyűjtő felületre kerülnek, amely a felejtő adatbázisban fogja szolgálni az információt felhasználó fejlesztőket. Az eredeti cella pedig üres *megjegyzés* nevű cellával várja az új modullal történt események leírását.

8.4.4. Az adatbázis fejlesztési lehetőségei

Az adatbázis kezdeti kiépítésében az eddig tárgyalt tartalmat képes befogadni, azonban akár a számítási módszer pontosításához, akár a nem számszerűsíthető információk befogadásához további rutinokkal bővíthető. A bővítés igénye az alábbi okokból merülhet fel.

- Szükség lehet **újabb számszerű élettartam-tényezők** bevezetésére, amelyek az egyenértékű működési időt a halmozódó károsító hatása révén fokozza az abszolútnak tekintett naptári idővel szemben. Ezen tényezőket a fejlesztéssel foglalkozó csoport legtöbbször a „KO” tényezők keresésének módszerével azonosíthatja. Célszerű lehet, ha kezdetben az újonnan beillesztett tényező csak tájékoztató jellegű, hogy ismeretében összefüggéseket, hatásokat elemezhesenek.
- Amikor már az új tényező alapján meg lehet határozni az egyenértékű működési időre gyakorolt hatást, a hozzá kötődő **új faktort** meghatározni képes rutint is el lehet készíteni. Miután a faktorok alapértéke „1”, ezért a korábbi időszak adataival megközelítőleg összevethető. Kezdetben a faktorok csak kisebb mértékben (1-hez nagyon közeli) értékekkel számolnak, majd később, miután a hatására vonatkozóan nagyobb ismeret-mennyiség gyűlt össze, a valóságosat jobban közelítő érték adható. Amennyiben informatikailag megoldott a korábbi megfigyelési időszakok archiválása mellett az aktív együtt dolgozása (a kumulált értékekben való érvényesülése), a faktor módosítása akár visszamenőleg is lehetséges.
- Elképzelhető, hogy élettartamot meghatározó tényezőként minősített, ún. **kvalitatív élettartam-tényezőt** kívánnak megjeleníteni az adatbázisban. Ennél fontos szempont, hogy egyértelműen elkülöníthető legyen a tényező fennállása és figyelmen kívül hagyása, vagyis a logikai értelemben vett „kétállapotú jelleg”.
- A kvalitatív élettartam jellemző értelemszerűen a hozzá kötődő **kvalitatív faktort** is kétértékűvé teszi. „1” – ha a tényező figyelmen kívül hagyható, valamint ettől eltérő pozitív szám, ha befolyásolja.
- Az adatbázis használata közben igény merülhet fel **újabb minőségi adatok** feljegyzésére, amely modulokhoz, helyszínekhez, valamint időszakokhoz köthető. Ezen funkció beillesztésekor különös figyelmet kell fordítani az érintett állományok hivatkozásaira, hogy az információk mely elemeknél (csoportoknál) jelenjenek meg, mint releváns információk. Logikus elvárás lehet, hogy bizonyos információk a széria azonosításánál automatikusan „beíródjanak”, vagy hivatkozással realizálódjanak minden érintett sorban.
- Szükség lehet a meglévő időpontok (beszerelés és tönkremenetel) követése mellett **más fontos időpontok** megjelenítésére. Ezek vagy passzívan, csak tájékoztató információként kerülnek vezetésre (pl. beavatkozásokról, körülmények változásairól), vagy aktívan kapcsolódnak az adatbázishoz, mivel a meglévő élettartam-számítási függvényeket is érintik (pl. a beszerelések után megnevezett „KO” paraméterek élettartamot befolyásoló hatásai beszámításának kezdetével).

Bizonyos szériák kifutásakor és termékegyedeik tönkremenetelét követően célszerű lehet az adatbázis tehermentesítésére, olyan módon, hogy a korábbi fejezetekben említett *éles felejtéssel* az egyed és a hozzá tartozó információk törlődnek. A törlést bizonyára az elemzések (kigyűjtések csoportos kiértékelések) elvégzése után parancsra vagy időkésleltetéssel akár automatikusan is megvalósíthatja a program. Ezzel a funkcióval elérhető, hogy a változó üzemi jellemzők követése és dinamikus archiválása csak működő egyedekre folyjon, így csak az aktív egyedek követése igényel erőforrásokat. A kifutott szériák már csak külső, statikus (pl. DVD) adathordozókon kerülnek archiválásra.

8.5. Élettartam vizsgálatok az adatbázisból nyert adatok felhasználásával

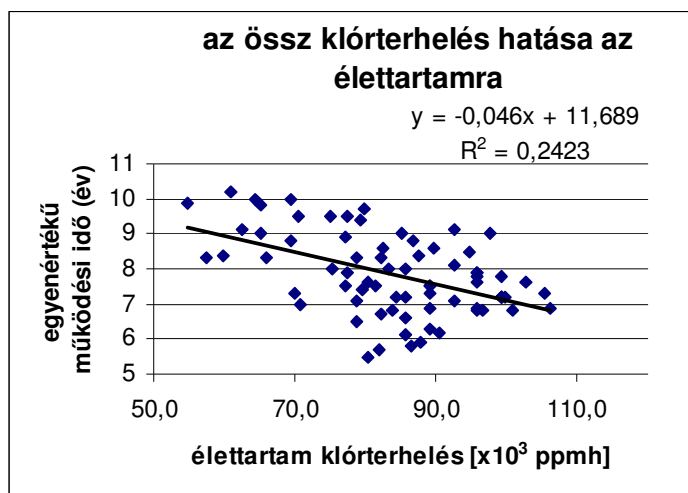
Mivel a jelenlegi üzemszerűen vezetett adatbázis nem alkalmas ilyen jellegű információk fogadására, de az in-line adatforgalom alapjai léteznek, ezért csak korlátozott mennyiségű modul életének nyomon követésével, valamint a gyártó öregítő teszteléseket végző laborjában van lehetőség az adatok felvételére és feldolgozására. Ez egy fejlesztés alatt álló adatbázisból történik.

8.5.1. Összefüggések elemzése az élettartam és a klórterhelés közt

Korábban megállapítottuk, hogy a bruttó működési idő (a beszereléstől a tönkremeneteli időpontig eltelt idő) alapján számított élettartam adatok nem fejezik ki pontosan azt az időt, amit a beszerelt egység aktív funkcióellátással töltött. Ezen kívül az aktívan töltött élettartam sem elég pontos információ, ha figyelembe vesszük az egyedeket ért igénybevételek eltérő mértékét. Ebből következően a hagyományos élettartam adatok – mint valószínűségi változók – elemzéseibe már a kezdetekkor is kétféle torzítás jelenik meg. Ennek a kettős torzításnak a mérséklésére szolgál a korábban bevezetett „*egyenértékű működési idő*”.

Az adatbázis alapján az elemzésekre alkalmas csoportokban meghatároztuk az egyedeket ért kumulált vegyi jellegű terhelést, az „*élettartam klórterhelés*” mértékét, valamint az „*egyenértékű működési időt*”.

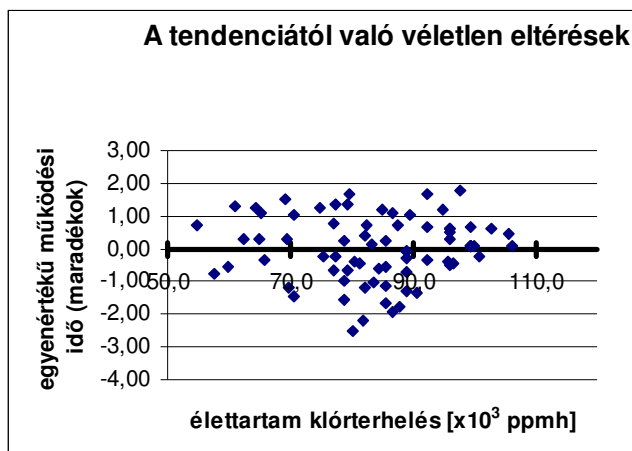
Miután mindkettő egy mesterségesen képzett jellemző, a köztük feltételezhető regresszió és korreláció elemzése is újszerű megközelítés, és jelen kutatásunk eredményeként tekinthető.



52. ábra A modulokon számított egyenértékű működési idő alakulása az élettartamuk során kalkulált összesített klórterheléssel [x10³ ppmh]

Ahogy az a későbbi elemzésekből kiderül, az élettartam klórterhelés és az eredeti feltételezésünk szerint csökkenő egyenértékű működési idő matematikailag mutat szignifikáns kapcsolatot ($r=0,49$ $r_{krit}(P=95\%, v=72)=0,24$). A meredekségre elvégzett statisztikai próba viszont azt igazolja, hogy a meredekség értékének megbízhatósági tartományába az $m=0$ is beletartozik, vagyis 95% szignifikancia szinten ez alapján is kijelenthetjük, hogy az egyenértékű működési idő közel azonos a megfigyelt moduloknál. Ezen regresszió elemzéssel indirekt módon tehát feltételezhető, hogy a képzett élettartam jellemző véletlen változók és jellegzetes természetes eloszlást mutat egy közel állandó középérték körül. Bizonyoságot csak a későbbi fejezetben elvégzett Weibull illeszkedés vizsgálat adhat.

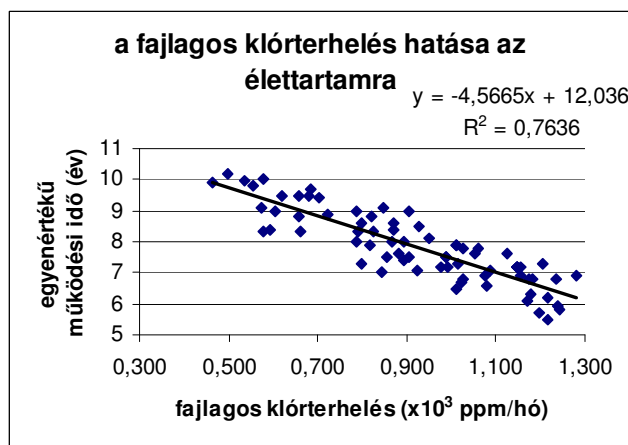
Jelen megállapításunkat a rezidumokról készített diagram is alátámasztja, mivel a diagramból kiderül, hogy a trendvonaltól való elérések véletlenszerű előjelűek és nagyságúak. A diagram továbbá igazolja a regresszió linearitására vonatkozó feltevésünk helytállóságát is.



53. ábra Az élettartam klórterhelésnek $[x10^3 \text{ ppmh}]$ az egyenértékű működési idő trendvonalra körüli véletlen változását mutató maradékdiagram

A csak matematikailag kimutatható ellenirányú változás jellegtelen voltának oka, hogy bár az élettartam során ható klórterhelés mértéke jobban károsítja a szűrő polimer anyagát, viszont az öregedést okozó dózist is hosszabb idő alatt veszi fel. Mindez azt is jelenti, hogy a szűrőkre ható klórterhelés az alkalmazás során egyletesen oszlik el, így az azonos körülmények közt működtetett modulok tönkremeneteli folyamata egyenletes, valamint hogy a többi öregítő hatás egyensúlyban van. Hosszabb élettartam alatt ugyan nagyobb lesz az összegzett klórterhelés mértéke, azonban csak kisebb egyéb terhelés esetén érhet meg magasabb kort a szűrőmodul (pl. a megengedett fluxus túllépése, túl erőteljes levegőztetés, kemény nyersvíz stb.).

Elvégeztük a klórterhelés egységnyi működési időre való fajlagosítását, és ebben viszont egyértelműen megállapítható volt, hogy a nagyobb fajlagos klórterhelés rövidebb élettartamot enged meg. Itt mind a korrelációs tényező ($r=0,87$; $r_{krit}(P=95\%, v=72)=0,24$), mind a trendegyenes meredekségének megbízhatósága igazolta az összefüggésre vonatkozó hipotézisünket.



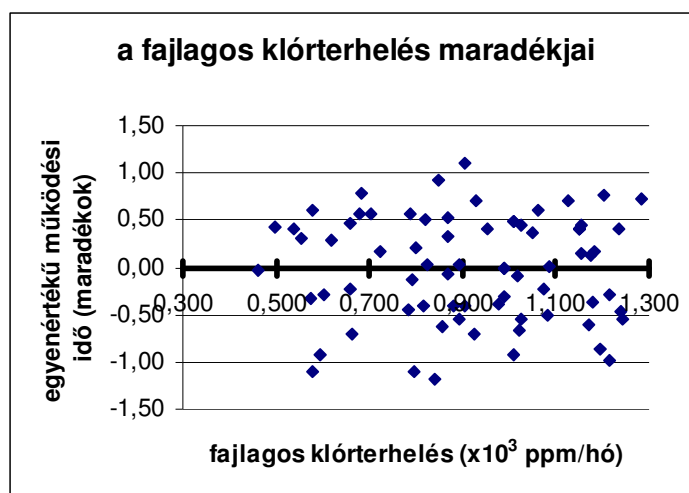
54. ábra A modulokon számított egyenértékű működési idő alakulása az egy hónapra fajlagosított klórterheléssel

Kijelenthető tehát, hogy nagyobb klór dózis esetén, vagyis:

- Nagyobb arányban előállított (kötelezően klórral fertőtlenített) ivóvíz, vagy
- egyéb okokból sűrűbb karbantartást igénylő szűrőegységek, (a szűrőlepeny és a mikroorganikus mélysegi eltömődés, klóros áztatással való semlegesítése)
- valamint a fegyelmezetlen karbantartás (a tisztítószert nem előírászerű és a pontos mérést nélkülöző adagolása) esetén

az élettartam várhatóan rövidül. Feltételezésünk szerint a hasonló körülmények közt üzemeltetett moduloknál ez becsülhetővé teszi a várható élettartamot akár más elemzés hiányában is, amennyiben rendelkezésre állnak a kérdéses klórterhelés és a működtetés paramétereit. [2. tézis]

Az összefüggésnél a rezidumokról készített kimutatás szintén a természetes eloszlás jellegét mutatta, valamint a lineáris modell megfelelőségét igazolta.



55. ábra A fajlagos klórterhelésnek az egyenértékű működési idő trendvonala körüli véletlen változását mutató maradékdiagram

Az elemzésben az adatok homogenitását is célszerű lenne vizsgálni, vagyis azt, hogy a regressziós elemzés szempontjából egyetlen halmaznak tekinthető-e, és valóban csak egy egyenes illeszthető-e rájuk, amely matematikai modellként szolgálhatna a két jellemző közti tendenciát illetően. A regressziós és a maradékdiagramok is kellő egyöntetűséget mutatnak, így ennek ismeretében jó közelítéssel homogénnek tekinthető az adathalmaz. A modulok klórterhelésének megadásával is (erre már eddig is szolgálnak közel hasonlóan képzett adatok) pontosabb megközelítő becslést lehetne tenni a várható élettartamra vonatkozóan.

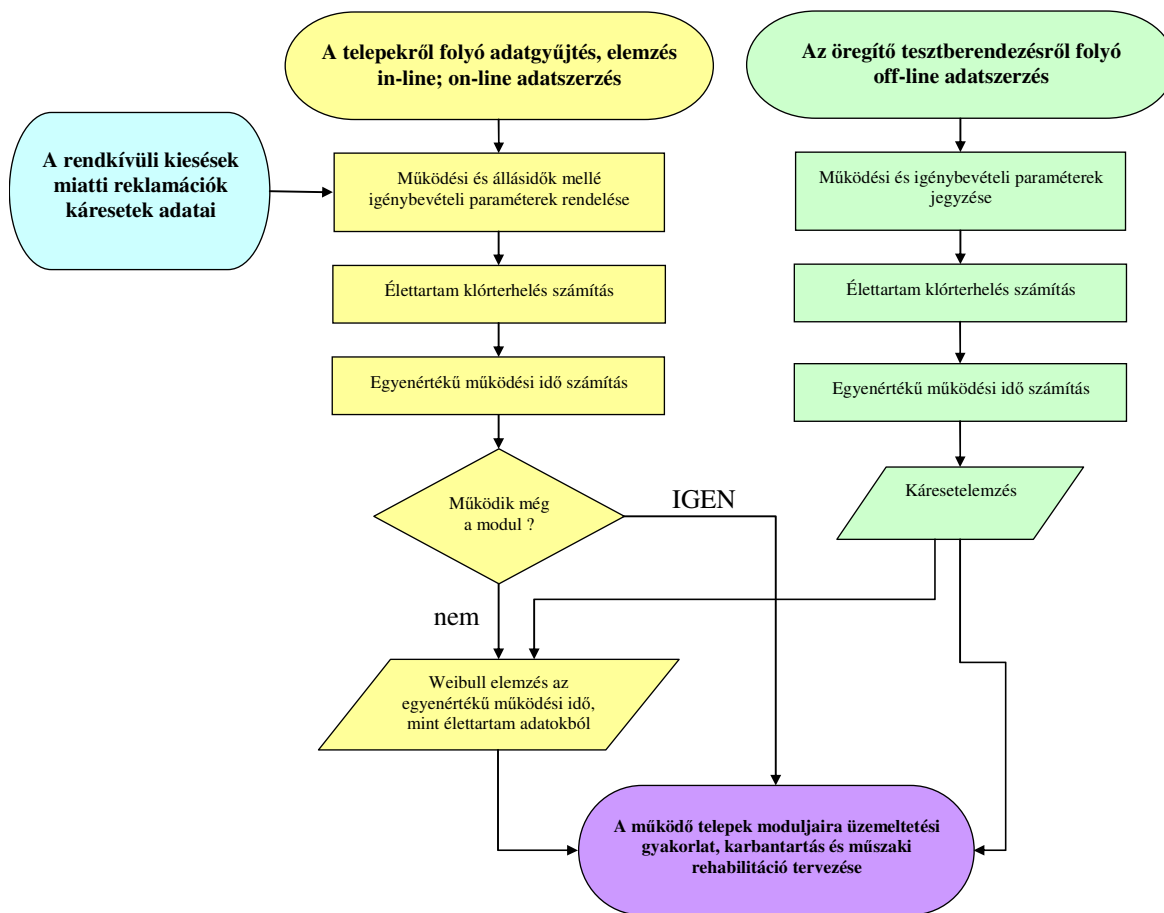
Mindez azért lenne a gyakorlatban célszerű ismeret, mivel a klórterhelés egyszerűen in-line mérésekkel megszerezhető információ, amit a szűrőkazettákhoz, illetve modulokhoz lehet rendelni, és ezáltal a karbantartási beavatkozásokat és cseréket is egzakt módon lehetne előre tervezni.

8.5.2. Weibull elemzések az újszerű élettartam jellemzőkkel

8.5.2.1. Az élettartam-elemzés folyamata

Az élettartam elemzések pontosságának növelése érdekében munkánk során kidolgoztuk – és korábban már ismertettük – az *egyenértékű élettartam* fogalmát, amely nem a tényleges naptári idő alapján szerepelteti az élettartam adatokat, hanem csak egy transzformációt követően. A transzformációt az indokolja, hogy a különböző helyszíneken, különböző környezeti feltételek közt különböző üzemeltetői igények és szokások esetén a naptári idő nem pontosan tájékoztat a ténylegesen elszenvedett, kumulálódó károsító hatások mértékéről.

Az üzemi területekről, működő elemekről jövő, a reklamációkban szereplő káresetek visszakövetéséből szerzett és a gyári tesztberendezésen öregített egyedekről jövő elemzések adatainak felhasználási és feldolgozási folyamatát az 56. ábrán követhetjük nyomon.



56. ábra Az élettartam elemzések rendszerének elvi ábrája

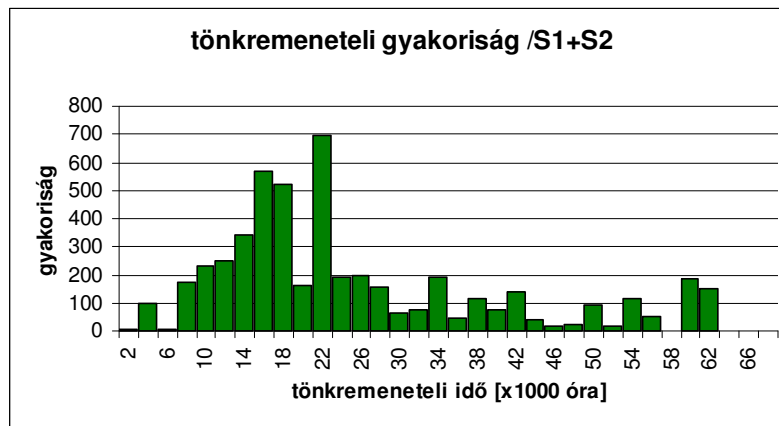
Az in-line és az on-line módon megszerzett üzemeltetési adatok, valamint az öregítő teszteknél tapasztaltak alapján az élettartam elemzéseknél a szokásos megközelítés szerint Weibull eloszlást feltételeztünk. Membránszűrők esetére a műszaki kialakítás és a tönkremenetelek eddig megismert lefolyása szerint a kétparaméteres formát választjuk, amelynek helyességét a korábbi, valós naptári élettartamra vonatkozó elemzésekből kiindulva tudjuk. Ezt az a tény indokolja, hogy a meghibásodások szempontjából nem ismert – a szakirodalom sem említi és nem is mutatható ki – olyan kezdeti időszak az élettartamokban, ameddig szerkezeti vagy más okokból gyakorlatilag nincs meghibásodás, vagy ha van is, nem beszámítható a későbbi

időszak elemzéseibe. Amennyiben ilyen körülményekkel kellene számolni, megalapozott lehetne a feltételezés a háromparaméteres Weibull eloszlás használata, eltérően az elemzési területünktől.

8.5.2.2. Elemzések a naptári idővel számított valós élettartamokból

A rendelkezésünkre álló adatok és a kialakított *élettartam adatbázis* (60. ábra) alapján elemzéseket folytattunk. Az egyenértékű működési időkké transzformált működési időtartamokat osztályokba soroltuk, majd a hálózaton az összegzett relatív gyakoriságokból számolt tapasztalati kiesési valószínűség-eloszlás függvényt kaptuk.

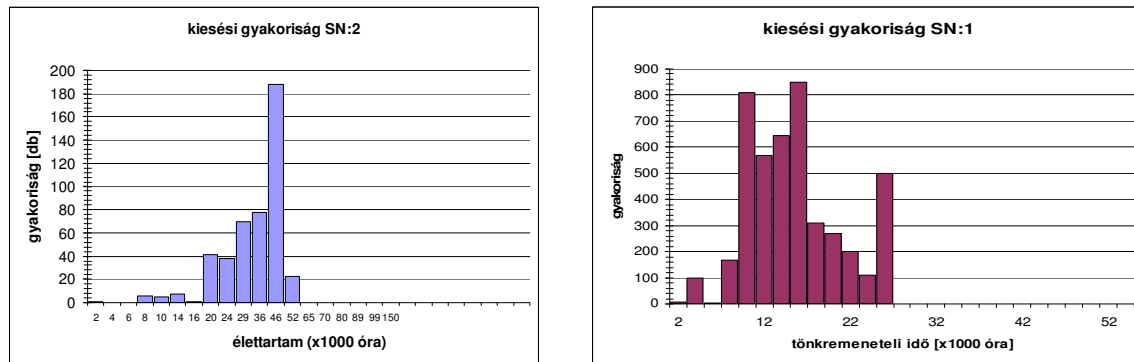
Az élettartam elemzések első lépéseként az eredeti, naptári órákban számolt élettartamok eloszlását vizsgáltuk meg. Osztályba sorolást követően az alábbi tapasztalati kiesési sűrűségfüggvény rajzolódott ki.



57. ábra A kiesési sűrűség alakulása a vizsgált szűrőgyedeknél a teljes adatsoron

A görbe lefutása alapján feltételezhető a kevert jelleg, mivel különösen a módusznál nagyobb értékeknél a burkológörbe lefutása zavaros, nem a törvényszerűségeket követő véletlenszerűségek szerinti. Bár azonos célra, helyre és igénybevételekre tervezett modulokat elemeztünk, de két különböző tételből származtak, így joggal feltételezhető az inhomogenitásuk.

A tételazonosító alapján az adatokat szétválogattuk, így az alábbi két tapasztalati sűrűségfüggvényhez jutottunk.



58. ábra A kiesések tapasztalati sűrűségfüggvényei a tételek szétválasztásával

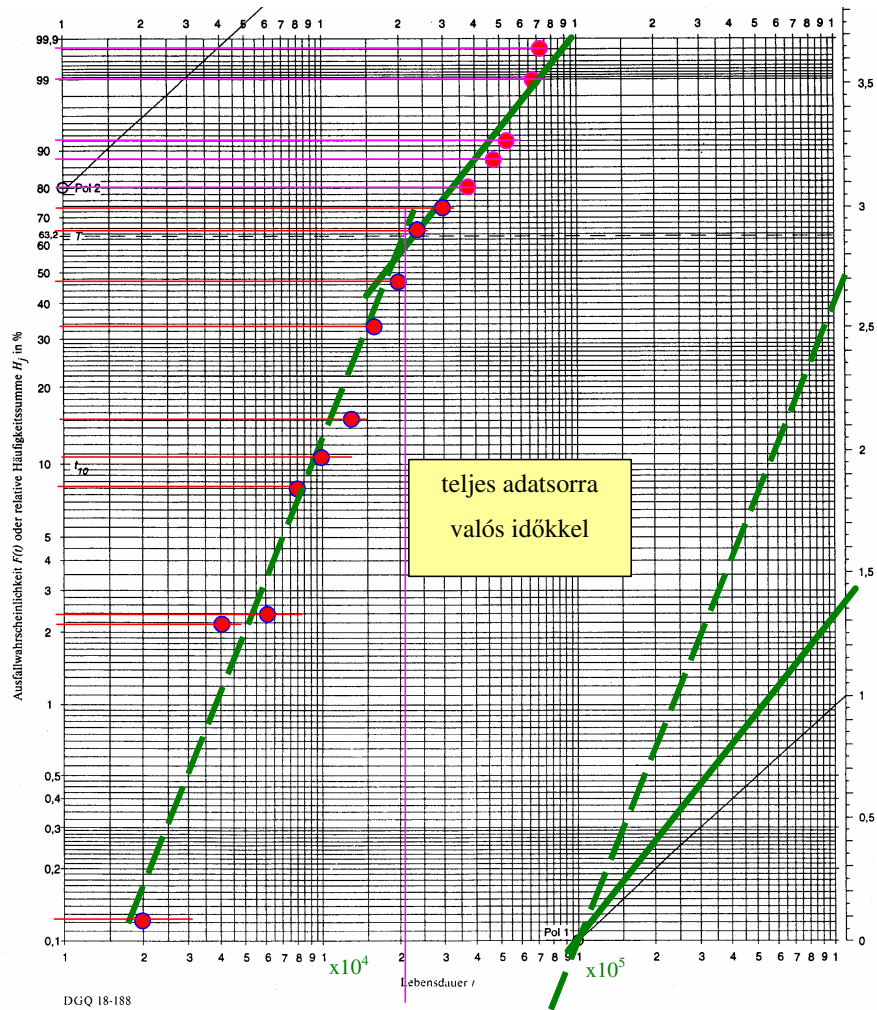
A tételek közti jelentős különbség a sűrűségfüggvényeken egyértelműen kirajzolódik a görbe lefutásában. Ez legfőképpen a Weibull eloszlás alakparaméterének értékében okoz különbözőséget. A tételenkénti bontás még a karakterisztikus élettartam jelentős különbségét is sejteti, azonban a következő elemzésben látható, hogy a tételek adatainak keveredésekor ez nem látszik ennyire meghatározóan, a keveredés a sűrűségértékek eltéréseit kiegyenlíti. Megállapíthatjuk továbbá, hogy a kevert adatok tapasztalati sűrűségfüggvényén (57. ábra) pont a karakterisztikus élettartam tájékán egy sűrűsödési maximum (módusz) rajzolódik ki.

A Weibull hálóra való felvétel alapján az eloszlás kevert eloszlás képét mutatta, és a két szakasz paramétereit a következőkben állapíthatjuk meg:

13. táblázat A naptári időben mért élettartam adatokkal számolt Weibull paraméterek

	<i>szakaszonként az alakparaméter – b</i>	<i>szakaszonként a karakterisztikus élettartam – T_K</i>
<i>első szakasz (2e-18e óra)</i>	2,65	21 000 óra
<i>második szakasz (18e óra –)</i>	1,4	23 000 óra

Bár a pontok közé rajzolható vonalak hajlásából a gyártási eredetű vagy anyaghibák okozta változásokra következtethetnénk, a metszéspontot követően az alakparaméter csökkenése nem igazolja a kádgörbéknél megszokott tendenciát, az öregedéssel járó kiesési ráta növekedést, így a növekvő meghibásodási rátát. Vagyis megállapítható, hogy az adatsor kevert jellege inkább a gyártási tételek közti minőségkülönbséggel hozható összefüggésbe.



59. ábra Élettartamháló a valós adatokra, az eredeti működési idő figyelembevételével

8.5.2.3. Elemzések az egyenértékű üzemi idővel számított élettartamokból

Az egyenértékű élettartam adatokkal számolva a kétparaméteres Weibull eloszlás transzformációs hálójára felvéve, az 60. ábra szerinti eloszláskép rajzolódik ki.

14. táblázat Egyenértékű élettartam adatokkal számolt Weibull paraméterek

	szakaszonként az alakparaméter – b	szakaszonként a karakterisztikus élettartam – T_K
első szakasz (2e-18e óra)	1,15	550 000 óra*
második szakasz (18e óra –)	4,7	75 000 óra*

Az egyenértékű üzemi idővel számított egyenértékű élettartam adatok elemzésekor szembevetendő, hogy az eloszlás képe nagyban különbözik a naptári órákkal számítottaktól. Ez a terhelési

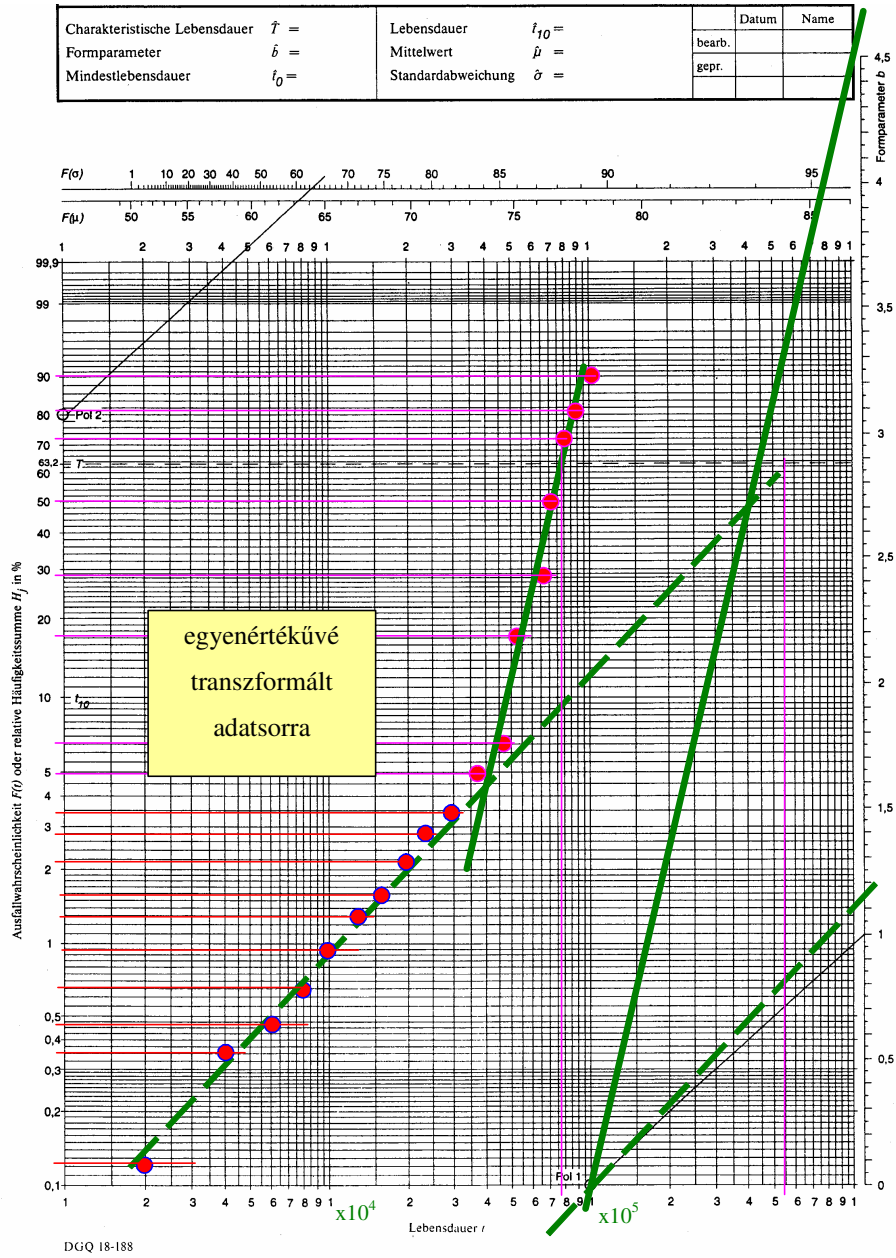
szintek okozta károsító hatások súlyozásából, és így az öregedési folyamatok eltéréseiből adódik.

A két szakasz a görbén továbbra is észrevehető, azonban az alakparaméterek alakulása pont fordítottja a naptári órákkal számoltaknak. Ez azt is eredményezi, hogy a kádgörbéről alkotott kép tér vissza, miszerint a kiesési ráta az öregedés előrehaladtával növekszik, vagyis a károsító hatások a szerkezeti károsodásokat fokozzák, és egyre nagyobb a működőképesek közül a meghibásodók aránya.

Megfigyelhetjük viszont, hogy a görbejelleg változásának, a szakaszok irányváltásának helye nem változott ilyen karakteresen. Amíg a naptári órákkal számoltaknál 18-22 000 óra körüli, addig az egyenértékű élettartammal számolt diagramon ez 40 000 óra körülire növekszik.

A későbbiekben a rutinszerűen, széles körben végzett elemzések alapján elképzelhető, hogy az egyenértékű élettartam alapján tett megállapítások naptári idővé való visszatranszformálásakor a szakaszok metszéspontja jelenthet támpontot.

Míndez tehát lehetővé teszi, hogy az adatok összehasonlíthatóvá váljanak, ha különböző körülmények közt működő telepeken vannak beépítve, vagy esetleg az öregítő tesztek „gyorsított” viszonyai közt válnak használhatatlanná.



60. ábra Élettartamháló a valós adatokra, az egyenértékű működési idő figyelembevételével

9. Véggövetkeztetések, a továbbfejlesztés lehetőségei

A disszertáció a membránszűrés technológiáját alkalmazó szennyvíztisztítás területén, szűrőmembránok élettartam elemzéseivel foglalkozik. Elemzéseket, a gyártást, fejlesztést, üzemeltetés-támogatást folytató cégek eddig is végeztek, azonban az eltérő körülmények közt tönkremenő egyedek azonos elbírálására nem volt kielégítő módszer. Munkám elsősorban erre a problémára igyekszik objektív összehasonlítást tenni. Ennek során új fogalmak kerültek bevezetésre, új számítási metodikát dolgoztam ki. A gyakorlati adatokkal történő vizsgálataim során meg kellett oldani az adatgyűjtés és -rendezés problémáit, aminek eredményeképpen új adatstruktúrát és az adatok kezelését végző programot dolgoztam ki. A rendelkezésemre bocsátott adatokból a módszer igazolásaképpen értékeléseket és elemzéseket végeztem.

Más analógiákból levezetve az összehasonlítható terhelési mértékek megadása érdekében kidolgoztam az „élettartam klórterhelés” fogalmát és számításmódját. Ehhez kapcsolódóan határoztam meg az *egyenértékű működési időt* és az *egyenértékű élettartamot* (az egyenértékű működési idő a tönkremenetelig) értelmezve annak fogalmát és számításának módszerét.

A témát befogadó cég gyakorlati szakemberei a kérdéskör általam történő megközelítését adekvátnak tartják, saját problémáik megoldását remélik tőle. Az adott termék esetére való, a leírtakat figyelembe vevő számításmódot nem használták, az általam kidolgozott értékelési rend az eddig alkalmazott elemzéseken műszaki vonatkozásban lényegesen túlmutat. Esetenként az irodalomban is felfedezhető az általam végigjárt gondolatmenet analógiája, de a termékhez hasonló adatkörnyezetre megoldásokat, eredményeket nem publikáltak. Amennyiben az üzemeltetési, karbantartási és felújítási időszakok vezetése pontosabb és izolálhatóbb lesz, az élettartam klórterhelés számítása is jobban fog közelíteni a valós értékekhez. Hasonló módon, ha az in-line és on-line módon érkező adathalmaz adatbázisba juttatása, automatikus átlagolása, frissítése informatikailag fejlődik, egyre pontosabb lesz az egyenértékű üzemidő által megfogalmazott jellemző. További fejlesztési terület, hogy újabb kritikus élettartam tényezők felfedése esetén újabb módosító faktorok kerüljenek az adatbázisba. A későbbiekben szintén a módszer fejlődését és ezáltal használhatóságát fogja javítani, ha a jelenleg megállapított faktorok értékeit kísérletekkel, feltételek tisztázásával a további kutatások pontosítják.

A kutatásomban elsőként definiáltam az „igénybevételi *arculat*” fogalmát, amely egy termék felhasználási környezetének terhelő-károsító hatásait foglalja össze és teszi kompakt módon átláthatóvá. Megalkottam továbbá az „élettartam *profil*” fogalmát is, amelynek részét képezik az igénybevételi *arculat* tényezői, de további tényezőket vesz számításba, úgymint a termék anyagának tulajdonságai vagy a gyártás paraméterei. Mindkét fogalom csak elvi megközelítésként szerepel jelen dolgozatomban, tudottan, hogy a terméktervezés, -fejlesztés és a technológia változtatásai során szükséges lenne a pontos terméktípus-üzemi hely párosítás konkrét meghatározása.

Az elsőként alkalmazott módszerek körébe tartozik, hogy adaptáltam egy élelmiszeripari területen ismert *döntési fát*, amelyet itt a kritikus élettartam tényezők kiválasztására a gyakorlatban is alkalmaztam. Mindehhez meghatároztam a döntési tényezők monitorozásának alapgondolatát. A tanulmány gyakorlati eredményeit bővítené, ha a kritikus tényezők (*KO tényezők*) kiválasztásának lépését újtelepítésű szennyvíztisztítóknál, illetve jelentős technológiai átalakításoknál visszatérően elvégeznék.

Az elemzés tárgyául szolgáló szűrőmodulok adatait, üzemi változóit és faktorait tartalmazó adatbázist az adatstruktúra szintjén fejlesztettem ki. Ez biztosítja a gyűjtött adatok hibáinak

csökkentését, az egyenértékű élettartam meghatározásához szükséges legfontosabb adatokat, valamint egyéb információkat, melyek a beavatkozásokat támogathatják. Az adatkezelés üzemi megoldását magasabb szintű programnyelven a kutatás gyakorlati rendszerezése során kell megvalósítani. Ez a professzionális adatbázis-kezelő program lesz képes gördülékenyen megvalósítani a beavatkozások előkészítését.

A dolgozatban felvetett számítások mindegyikére készítettem a módszer használhatóságának igazolására szolgáló elemzéseket. Az „*élettartam klórterhelés*” élettartamra gyakorolt hatását összefüggés-elemzéssel vizsgáltam, és megállapítottam, hogy az időszakra eső fajlagosított klórterhelés értéke szignifikánsan befolyásolja az egyedek élettartamát. Vagyis egyéb tényezőknek is kimutatható a hatása, de az élettartam alatt az egyedet érő kumulált klórmennyiség alapján releváns kijelentések tehetők a várható élettartamra, a beavatkozások tervezhető időpontjára vonatkozóan.

A szűrőegyedekről megszerezhető adathalmaz alapján, a létrehozott élettartam adatbázis segítségével „*egyenértékű működési időket*”, majd abból „*egyenértékű élettartamokat*” számítottam. Mindezekből a területen jól ismert Weibull elemzéseket végeztem, amelynek újszerűségét az adja, hogy nem naptári időből számított adatokkal, hanem az egyenértékű működési idők figyelembevételével készítettem el. Az elemzés során kiderült, hogy a kétféle időlépték (a naptári és az egyenértékű idők) mentén végzett elemzések Weibull hálón mutatott képei eltérőek lesznek. Az adatbázis használatával elemzések sora szükséges ahhoz, hogy a módszert alkalmazó szakember biztonsággal alkalmazhassa a transzformációkat az új és a régi számítási módszertan közt. Ez azért fontos, hogy a károsító hatásokat súlyozva, de objektíven számított egyenértékű működési időből rajzolt Weibull jelleggörbének a pontjaiból és jellegzetességeiből valós (naptárban kezelhető) használati időkre és tervezett beavatkozási időpontokra tudjon következtetni.

A kapott élettartam-statisztikák alkalmasak arra, hogy a beavatkozások alapjául szolgáljon. Mivel a beavatkozások közül a terméktervezés és a gyártás folyamata magas szinten szabályozott, az üzemi karbantartás területén indokolt a szabályozási kört kialakítani. A szabályozás sajátossága, hogy egy statisztikai értékelés (a kádgörbe jellegzetes meredekségei és határpontjai) alapján történik a beavatkozás. A lehetséges beavatkozások a tisztítási és karbantartási ciklusidők és klórkoncentrációk, a nyomáshatárok, a levegőztetési körülmények módosításai lehetnek. A beavatkozások határhelyzetére és stratégiájára az adatbázis kellő feltöltöttsége esetén célszerű kísérlettervet készíteni. Jelen kutatási munkánkban arra törekedtünk, hogy a fontosabb beavatkozások esetére gyakorlati eredményeken keresztül igazoljuk a korrelációk olyan magas szintjét, mely a szabályozást műszakilag megalapozottként mutatja.

A gyakorlatban működő berendezések adatai alapján statisztikai értékelést végeztem a fontosabb kapcsolatok erősségére. Ennek érdekében a minőségügy területén elterjedt lineáris korrelációelemzés eredményei 95 %-os statisztikai biztonsággal meghatározó módon igazolják az egy hónapra fajlagosított klórterhelés-egyenértékű élettartam kapcsolat meglétét. Szignifikáns kapcsolat nem volt igazolható a teljes élettartamra eső klórterhelés-egyenértékű élettartam adatok kapcsolatára. Az eredmény logikusan indokolható az időbeli integrálódás élettartammal való arányossága miatt.

Mindezen továbblépési lehetőségek és további tudományos igényű kutatási feladatok reményében várom a gyakorlati bevezetés tapasztalatait.

10. A dolgozat tézisei

1. Tézis

Munkám elvégzésére a modulárisan kezelhető szűrőelemek élettartam követésével kapcsolatosan új metodikai módszert vezettem be, amely alkalmazásával az elemzést végző csoport objektivitásra törekedve, szelektálni képes az élettartam jellemzőket.

Korábbi módszert elsőként dolgoztam át és adaptáltam arra a célra, hogy az élettartamot kritikus befolyásoló („KO”) tényezők zárt kérdések sorozatával, speciális „döntési fa” segítségével kiválaszthatók legyenek, valamint megalkottam a kiválasztott tényezők monitorozásának elvi folyamatát.

2. Tézis

A membránszűrők tisztítására, karbantartásra alkalmazott nátrium-hypokloritos kezelés kumulálódó károsító hatásának nyomon követésére egy számszerűen jellemezhető, számítógépes adatkapcsolatot, vagy más hatékony információáramot igénylő számításmódot dolgoztam ki. A teljes életciklusra vonatkoztatott, eltérő üzemállapotok mentén végzett számítás újszerű.

Az élettartam során ható klórterhelés számszerűsítésére kialakítottam az „ÉLETTARTAM KLÓRTERHELÉS” fogalmát és számításának módját, amely a klórt alkalmazó membránszűrés technológiájában a víztisztító létesítményekre kísérletileg is igazoltan megfelelő.

$$LCl_{total} = \sum T_0^* \cdot cc_0 \cdot t_0 + \sum T_K^* \cdot cc_K \cdot t_K + \sum T_F^* \cdot cc_F \cdot t_F \text{ ahol:}$$

LCl – élettartam-klórterhelés

T* – hőmérsékleti faktor, amely a klór károsító hatását figyelembe véve a hőmérséklet függvényében súlyozó tényezőként szerepel, az egyes beavatkozás típusoknál egységesíthető

cc – a kezelésfajtánál alkalmazott Cl koncentráció értéke

t – az egyes beavatkozás típusok összegzett ideje, ameddig az adott állapotjelzőkkel jellemezhető közeg hatott

o – Indexként a normál üzemet jelöli, amikor klórt adagoltak a nyersvízhez

K – indexként a karbantartási beavatkozást jelöli

F – indexként a helyreállító beavatkozást jelöli

3. Tézis

Néhány működési paramétert folyamatosan figyelembe vevő, de bővíthető metodikai módszert dolgoztam ki a membránszűrés területére, amely feltételezi az üzemi változók számítógépes hálózaton keresztül történő transzportját és feldolgozását.

Megalkottam, és kísérleteimben alkalmaztam az „EGYENÉRTÉKŰ MŰKÖDÉSI IDŐ” és az „EGYENÉRTÉKŰ ÉLETTARTAM” fogalmát és számításának módját, amely az élettartamot rövidítő tényezők és együttállásai káros hatásainak halmozódását az eddig alkalmazottnál pontosabban figyelembe veszi, és azokat az eltérő körülmények közti üzemeltetésnél is összehasonlíthatóvá teszi.

$$\tau_e = \sum_{i=1}^n t_{e_i} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot \Phi_i \cdot TCl_i \cdot h_i \text{ ahol}$$

τ_e – egyenértékű élettartam

t_e – egyenértékű működési idő

t – az azonos körülmények közt eltelt naptári idő

ϕ – a fluxus fenntartásához szükséges hidrodinamikai terhelési faktor

TCl – a hőmérsékletet és a klórterhelést egyszerre figyelembe vevő kombinált faktor

h – a közeg egyes összetevőinek kicsapódási hajlamát figyelembe vevő faktor

4. Tézis

Informatikai háttérrel, ezen belül legalább napi információszerzést és számítógépes adatkapcsolatot, valamint adatbázis kezelő programot igénylő, ipari felhasználásra is alkalmazható adatstruktúrát dolgoztam ki. Az adatstruktúra lehetővé teszi a termékfejlesztést, a tervezés, gyártás és a létesítmény üzemeltetés vonatkozásában.

Létrehoztam és a kísérleti fázisban az egyenértékű élettartam számításokra alkalmaztam is az „ÉLETTARTAM ADATBÁZIS” struktúrát, amely tartalmában és funkcióiban az adatok gyűjtését, feldolgozását és archiválását egyaránt megvalósítja. Ez alkalmas arra, hogy a termékek életútjának nyomon követésével használható visszacsatolást biztosítson a terméktervezésre és -fejlesztésre, a gyártástechnológiára, a karbantartási és üzemeltetési folyamatokra, valamint az ezzel kapcsolatos beruházási döntésekre.

5. Tézis

A jelenleg elszigetelten megjelenő gyorsított tesztek adatai, a hibastatisztikák eseti adatai és a felhasználás során keletkező tömegadatok összemérhetősége és integrálása érdekében az ÉLETTARTAM ADATBÁZIS kiegészült olyan adatelemekkel, melyek segítségével a kapott időintervallum számadatokat át lehet számolni egyenértékű élettartamokká (3. tézis).

Az általam kidolgozott „ÉLETTARTAM ADATBÁZIS” alkalmas arra, hogy a termékek üzemi működéséről az üzemeltetőktől, a káreseteket elemzőktől, és az üzemi tesztelő berendezésekről szerezhető kvalitatív és kvantitatív adatokat összevonja, valamint a releváns számítások elvégzése mellett minőségi jellegű információkat szolgáltatson, archiváljon.

6. Tézis

A valós üzemeltetési adatokkal feltöltött ÉLETTARTAM ADATBÁZIS alapján, elkülöníthető gyártási tételek kigyűjtött adataiból, jól meghatározott faktorokból kiindulva élettartam-elemzést végeztünk bizonyítva, hogy a 4. tézisben jelzett visszacsatolásokhoz megfelelő kapcsolati rendszer igazolható.

A szűrőmembránok EGYENÉRTÉKŰ ÉLETTARTAM értékeiből kevert Weibull eloszlás mutatható ki, és a számítási metodika segítségével eltérő körülmények közti üzemeltetés esetén is alkalmas az élettartam alakulásának a leírására, biztosítva ezzel azokat a feltételeket, melyek a karbantartási rendszer szabályozásához szükséges.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Bár a dolgozat utolsó oldalait használom, de nem utolsó sorban szeretném a köszönetemet kifejezni mindazoknak, akik e kutatás létrejöttéhez és életem ezen tudományos mérföldkövének eléréséhez hozzásegítettek.

Kollégáimnak, akik a fontosabb megpróbáltatások idején szabadidőt nem kímélve, önzetlenül vállaltak részt munkahelyi feladataimból és lelkesen motiváltak az elkészítésben.

Marschall Marcell egykori kedves kollégám, valamint **Maloveczky Gyula**, akik ismereteik megosztása mellett lehetővé tették, hogy cégük a kutatási témának „otthont adjon”, valamint magyarázataikkal meghatározóan segítették a dolgozat szakmai alaposágát.

Dr. Koczor Zoltán, aki tudományos szemléletmódom alakulásáért és szakmai fejlődésemért több évtizede felelősséget érez, továbbá ötleteivel és építő kritikáival odaadóan támogatta a disszertáció létrejöttét a témaválasztástól a megvalósulásig.

Barabás Eszter és kedves családja, aki a kezdetektől fogva pártfogolt, segített, lelkesített az idejüket rabló munkában, valamint fejlesztette az értekezés színvonalát.

Irodalomjegyzék

- [1] Robert W. Sherill, Louis A. Johnson: **An alternative to data transformation is to find a non-normal distribution**
(*Quality Progress – January 2009*)
- [2] Gregász Tibor: **Az élettartam vizsgálatok adaptációs kérdései membránszűrőknél**
(„Jövőbe mutató technológiák a környezetvédelemben és a könnyűiparban” című BMF konferencián elhangzott előadás – 2009, és a megjelenésben levő kiadvány)
- [3] Stefan Bracke, Stephan Haller: **Prävention durch Präzision**
(*Qualität und Zuverlässigkeit, Köln – júlíus 2009*)
- [4] Curt Ronniger: **Doppelt exponentiell**
(*Qualität und Zuverlässigkeit, München – december 2009*)
- [5] Koczor Z., Göndör V., Gregász T.: **Mérési rendszer fejlesztése technológiai sorba épített mérőeszközök esetében**
(„Jövőbe mutató technológiák a környezetvédelemben és a könnyűiparban” című BMF konferencián elhangzott előadás – 2009 és a megjelenésben levő kiadvány)
- [6] Karsten Pickard: **Qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen**
(*Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente, Stuttgart – 2008*)
- [7] Kocsis Zoltán: **Farosttal erősített polimer kompozitok fejlesztése**
(*PhD értekezés /tv.: Czigány Tibor/, BME – 2008*)
- [8] Necip Doganaksoy, Gerald J. Hahn, William Q. Meeker: **The Pros of Proactive Servicing**
(*Quality Progress – November 2008*)
- [9] Czél György – Kollár Mariann: **Anyagvizsgálati praktikum**
(*Sunplant Kft, Miskolc – 2008*)
- [10] Tibor Gregász, Endre Korondi: **Influence of Maintenance Strategies on Environmental Load**
(*Acta Polytechnica Hungarica Vol. 5. No.3. 2008 page: 29-37.*)
- [11] Gregász Tibor – Fekete Beatrix: **R&R vizsgálatok fejlesztése trendes jellemző mérési rendszerére**
(*Anyagvizsgálat a Gyakorlatban (4. AGY) Szakmai Szeminárium 2008. Kecskemét*)
- [12] Stefan Bracke und Stephan Haller: **Defekt - aber warum?**
(*Qualität und Zuverlässigkeit, Köln – november 2008*)
- [13] Rózsavölgyi Zsolt, Méhész István, Mihálovits István: **A roncsolásmentes vizsgálatok kiterjesztett alkalmazása az élettartam menedzselésében**
(*Anyagvizsgálók lapja. – 2008/3*)

- [14] Jörg Hoffmann: **Handbuch der Messtechnik**
(Carl Hanser Verlag, München – 2007)
- [15] Necip Doganaksoy, Gerald J. Hahn, William Q. Meeker: **Reliability Assessment By Use-Rate Acceleration**
(Quality Progress – June 2007)
- [16] ÁEF Laboratórium Kft. 2007-ben tartott előadásának prezentációja alapján.
(Fodor Olivér és Orosz Csaba hozzájárulásával)
- [17] Lothar Salamon und Ernst Weigert, Putzbrunn; Josef Köhler Kochel: **Für ein langes Leben**
(Qualität und Zuverlässigkeit, Kochel – Január 2007)
- [18] Koczor Z., Göndör V., Gregász T.: **Gyakorlatorientált módszer a mérési bizonytalanság folyamatos csökkentésére**
(Magyarországi Tanúsított Cégek XIII. NEMZETI KONFERENCIA 2006. Balatonfüred, ISBN 963 06 0730 1, "A" szekció A3 1-12 oldal)
- [19] Bronstein, Szemengyajev, Musiol, Mühlig: **Matematikai Kézikönyv**
(Typotex, Budapest – 2006)
- [20] Koczor Z., Göndör V., Gregász T.: **A mérési tevékenység folyamatos fejlesztése**
(Magyar Minőség – 2005/5)
- [21] Gregász Tibor – Keszei Adrienn: **Az autóiipari elvárások adaptálása textilipari környezetre mérőeszközök R&R vizsgálatainál**
(konferencia előadás IN-TECH-ED Budapest, BMF 2005 / Konferencia kiadvány: ISBN 963 9397 067, 2005. Textiltechnológiai szekció 171. oldal)
- [22] Bodor Géza, Vas László Mihály.: **Polimer anyagszerkezettan**
(Műegyetemi Kiadó, Budapest – 2005)
- [23] Koczor Z., Göndör V., Gregász T.: **A mérési tevékenység minőségirányítása**
(Anyagvizsgálók lapja. – 2004/1)
- [24] **Machine Condition Monitoring**
(Brüel&Kjaer kiadvány, – 2002)
- [25] Ginsztler J., Hidasi B., Dévényi L.: **Alkalmazott anyagtudomány**
(Műegyetemi Kiadó, Budapest – 2002)
- [26] Kozma Mihály: **Tribológia**
(Műegyetemi Kiadó, Budapest – 2001)
- [27] Pukánszky Béla: **Műanyagok**
(Műegyetemi Kiadó, Budapest – 2001)
- [28] Oláh József – Mucsy György: **A tápanyag-eltávolítási és az utóülepítési folyamatok hatásfoka a téli üzemi viszonyok között**
(MHT XX. vándorgyűlésén elhangzott előadások 3/14)

- [29] „Tudásbázisú karbantartás” **Konferencia kiadvány**
(Veszprémi Egyetemi Kiadó – 2003;
Szántó Jenő: *A karbantartási stratégiák és azok értékelése*)
- [30] Fodor Olivér, Gregász Tibor: **Anyagvizsgálat és mérés technika**
Segédlet a fémszerkezeti vizsgálatokhoz
(BMF RKK BTRI; ÁEF Labor Kft.– 2005)
- [31] Alex Porter: **Accelerated Testing and Validation**
(Elsevier Inc., Burlington, USA – 2004)
- [32] Wayne B. Nelson: **Accelerated Testing (Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis)**
(John Wiley & Sons Inc., Hoboken, USA – 2004)
- [33] Patkó István: **Környezettechnika I**
(BMF RKK 6006, Budapest 2004)
- [34] Lehofer Kornél.: **A hajtogatóvizsgálat újraértelmezése**
(*Anyagvizsgálók lapja.* – 2003/1)
- [35] Marcel Mulder: **Basic Principles of Membrane Technology**
(Kluwer Academic Publishers, Dordrecht – 2003)
- [36] Koczor Zoltán: **Minőségirányítási rendszerek fejlesztése**
(TÜV Rheinland Intercert – 2003)
- [37] „XI. Membrántechnikai Konferencia, TATA” **Konferencia kiadvány**
(MTESZ – 2001; „Kicsi Gábor – Bátoriné Ruzs Katalin:” *Bemerülő membrán bioreaktoros technológia az ipari szennyvíztisztításban*” előadása alapján.)
- [38] „Új utakon a karbantartás” **Konferencia kiadvány**
(Veszprémi Egyetemi Kiadó – 1999; „Balogh-Goizer-Kisdeák: *A járműmotorok légszűrésének helyzete az olajvizsgálatok tükrében*”)
- [39] „Das Lebensdauernetz:
DGQ 18-188” – 1999
- [40] Kemény Sándor: **Stasztikai minőség – (megfelelőség-) szabályozás**
(Műszaki Könyvkiadó, MMT – 1999)
- [41] Burschik, Csop, Pallay, Rózsa: **Kenés technikai kézikönyv**
(Műszaki Könyvkiadó – 1996)
- [42] Kántor István: **Kenés technikai ABC**
(Dunaprint; MOL, Komárom – 1996)
- [43] Gillemot László: **Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat**
(Műszaki Könyvkiadó, Budapest – 1996)

- [44] Gaál Zoltán, Kovács Zoltán: **Megbízhatóság Karbantartás**
(Veszprémi Egyetem, Kiadói Iroda – 1994)
- [45] Technical Report: **IEC/TR 62380:2004 – Reliability data handbook – Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment**
- [46] CENELEC European Standard: **IEC 61709:1996 – Electronic components – Reliability Reference conditions for failure rates and stress models for conversion**
- [47] Öllős Géza: **Vízisztítás – üzemeltetés**
(Egri Nyomda – 1998)
- [48] Keith Scott: **Handbuch of Industrial Membranes**
(Elsevier Science Publishers Ltd. – 1995)
- [49] K.K Aggarwal: **Reliability Engineering**
(Kluwer Academic Publishers, Dordrecht – 1993)
- [50] K. Slater: **Textile degradation**
(The Textile Institut; Textile Progress Volume21 N^o: 1/2)
(P W Harrison BscCText FTI MInfSc – 1991)
- [51] Aysen Türkman, – Orhan Uslu: **New Developments in industrial Wastewater Treatment**
(Kluwer Academic Publishers – 1991)
- [52] N. J. Horan: **Biological Wastewater Treatment Systems**
(John Wiley & Sons – 1990)
- [53] Benedek Pál: **Biotechnológia a környezetvédelemben**
(Műszaki Könyvkiadó – 1990)
- [54] Wiiliam Q. Meeker, Louis A.Escobar: **Statistics Methodts for Reliability Data**
(John Wiley & Sons – 1998)
- [55] R.G Gutman: **Membrane Filtration**
(Adam Hilger, Bristol – 1987)
- [56] Burkhard Wulfhorst: **Qualitätssicherung in der Textilindustrie**
(Carl Hanser Verlag München, Wien – 1996)
- [57] S. Sourirajan, – Takeshi Matsuura: **Reverse osmosis and Ultrafiltration**
(America Chemical Society, Washington D.C. – 1985)
- [58] Inczédi János: **Folyamatos és automatikus analízis**
(Műszaki Könyvkiadó – 1984)
- [59] Vincze István – Verbanova Mária: **Nemparaméteres matematikai statisztika**
(Akadémiai Kiadó, Budapest – 1983)

- [60] Christian Eichler: **Instandhaltungstechnik**
(VEB Verlag Technik, Berlin – 1982)
- [61] Blumenauer – Pusch.: **Technische Bruchmechanik**
(VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig – 1982)
- [62] Bodor Géza: **A polimerek szerkezete**
(Műszaki Könyvkiadó, Budapest – 1982)
- [63] Sváb János.: **Biometriai módszerek a kutatásban**
(Mezőgazdasági Kiadó, Budapest – 1981)
- [64] Jánossy A. – Muraközy T. – Aradszky G.-né.: **Biometriai értelmező**
(Mezőgazdasági Kiadó, Budapest)
- [65] Clyde R. Dillard – David E. Goldberg.: **Chemistry – Reactions, Structures and Properties**
(Macmillan Publishing Co., Inc. – 1981)
- [66] Vetier András: **Valószínűségszámítás**
(Tankönyvkiadó, Budapest – 1981)
- [67] George E. P. Box – W.. G. Hunter – J. Stuart Hunter.: **Statistic for experimenters**
(John Wiley & Sons, New York– 1978)
- [68] Erdélyi József: **Papíripari kémia III.**
(KMF, Budapest – 1976)
-
- [69] http://www.weibull.com/LifeDataWeb/the_weibull_distribution.htm
- [70] http://www.presse.fh-koeln.de/imperia/md/content/verwaltung/dezernat5/sg52/forschung/forschungsbericht/20082/cl4_forschung_2008.pdf
- [71] <http://olegkikin.com/shutterlife/>
- [72] <http://www.nkth.gov.hu/letolt/k+f/honlap/03.31/zenon.pdf>
- [73] http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TGK-3X9451F-2&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_searchStrId=1112160481&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=e072245766b9cbdedd92801ed87e81cb
- [74] <http://www.wwdmag.com/Laser-Nephelometers-Provide-Ultra-Sensitive-Membrane-Performance-Monitoring-article7279>
- [75] <http://www.chemietechnik.de/ai/resources/fe99e3782dc.pdf>

- [76] <http://www.staff.uni-oldenburg.de/dietmar.pfeifer/Kuehl.pdf>
- [77] <http://www.hydrologie.uni-oldenburg.de/ein-bit/11834.html>
- [78] <https://data.epo.org/publication-server/pdf-document?PN=EP0519028%20EP%200519028&iDocId=4836771&iepatch=.pdf>
- [79] <http://www.reference-global.com/action/doSearch?target=article&journal=labm&searchText=der+Lebensdauer+von+Verschlei%C3%9Fteilen&volume=14&year=1990&issue=2&journalCode=labm&issueDoi=10.1515%2Flabm.1990.14.issue-2&journalCode=labm&x=15&y=16&cookieSet=1>
- [80] <https://data.epo.org/publication-server/pdf-document?PN=EP0519028%20EP%200519028&iDocId=4836771&iepatch=.pdf>

Mellékletek

I. melléklet:

15. táblázat Az élettartam függvények és származtatásuk tapasztalati adatokból

A függvény jelentése, származtatása	Függvényalakok
<p>A meghibásodási valószínűség – G(t) – annak a valószínűsége, hogy az egyed egy adott időpontig tönkremegy. Lényegében az állományfüggvényből, egy kumulált relatív gyakoriságból becsülhető valószínűség eloszlásfüggvény:</p> <p>Miután működés és nem működés teljes eseményrendszert alkot és páronként kizáró, ezért igazolható, hogy:</p> $R(t) + G(t) = 1,$ <p>vagyis a becsült adatokból a meghibásodás valószínűsége:</p> $\hat{G}(t) = 1 - \hat{R}(t)$	<p>Állományból való becsléssel: $\hat{G}(t) = \frac{B_0 - B_t}{B_0}$</p>
	<p>exponenciális eloszlásnál: $G(t) = 1 - e^{-\lambda t}$</p>
	<p>Weibull eloszlásnál (2 paraméteres): $G(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$</p>
	<p>Weibull eloszlásnál (3 paraméteres): $G(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{T}\right)^b}$</p>
<p>A túlélési valószínűség – R(t) – annak a valószínűsége, hogy egy adott időpontban az egyed működőképes lesz.</p> <p>Értéke az állományfüggvényből becsülhető.</p>	<p>Állományból való becsléssel: $\hat{R}(t) = \frac{B_t}{B_0}$</p>
	<p>exponenciális eloszlásnál: $R(t) = e^{-\lambda t}$</p>
	<p>Weibull eloszlásnál (2 p): $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$</p>
	<p>Weibull eloszlásnál (3 p): $R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{T}\right)^b}$</p>

A függvény jelentése, származtatása	Függvényalakok
<p>A meghibásodási sűrűség függvény – $g(t)$ az állományfüggvény megváltozásáról tájékoztat, vagyis annak a valószínűségét jelenti, hogy az egyed egy adott időszakban megy tönkre.</p> <p>Általánosan: $g(t) = \frac{dG(t)}{dt}$</p>	<p>Állományból való becsléssel: $\hat{g}(t) = \frac{B_t - B_{t+\Delta t}}{\Delta t \cdot B_0}$</p>
	<p>exponenciális eloszlásnál: $g(t) = -\lambda e^{-\lambda t}$</p>
	<p>Weibull eloszlásnál (2 p): $g(t) = \frac{b}{T} \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$</p> <p>Weibull eloszlásnál (3 p): $g(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{T}\right)^b}$</p>
<p>A kiesési ráta függvény – $\lambda(t)$ – a kieséseket azaz a működőképes egyedszámban beálló változást az időszak elején még működő egyedek számára vonatkoztatja.</p> <p>Általánosan: $\lambda(t) = \frac{g(t)}{R(t)}$</p> <p>Ebből következően annak a valószínűségét adja, hogy az egyed az akkor még meglévő állományból a következő időszakban megy tönkre.</p>	<p>Állományból való becsléssel:</p> $\hat{\lambda}(t) = \frac{\hat{g}(t)}{1 - \hat{G}(t)} = \frac{B_t - B_{t+\Delta t}}{\Delta t \cdot B_t}$
	<p>exponenciális eloszlásnál: $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$</p>
	<p>Weibull eloszlásnál (2 p): $\lambda(t) = \frac{b}{T} \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}$</p> <p>Weibull eloszlásnál (3 p): $\lambda(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{T}\right)^{b-1}$</p>

II. melléklet:

16. táblázat A karbantartással és üzemfenntartással kapcsolatos elterjedt mérőszámok

MTTF	A meghibásodásig eltelt közepes időtartam (<i>mean time to failure</i>) nem javítható egyedekre alkalmazott mutató. Vagyis a meghibásodás egyszer alakulhat ki, de az már a végleges tönkremenetelt jelenti az egyedre nézve.
MTTFF	Az első meghibásodásig eltelt közepes időtartam (<i>mean time to first failure</i>). Javítható egyedekre, ahol a karbantartást nélkülöző működési szakaszt akarják jellemezni, különválasztva a későbbi karbantartások sorával zajló életszakasztól. Ez legtöbbször a vásárlói elégedettséget leginkább befolyásoló időszak, mivel a javítás néha be sem következik, mert a rövidéletű termékét a használó inkább eldobja és márkaelhagyó lesz.
MTBF	A javítható, karbantartás-igényes termékek egyik legfontosabb mutatója, amelyet az átlagos hibamentes működési időnek nevezünk (<i>mean time between failure</i>). Ezt a működési időt közvetlenül órákban mérhetjük. A definíció szerint, jellegzetes meghibásodási/ tönkremeneteli körülményeket feltételező exponenciális esetben az átlagos hibamentes működési idő – azaz az MTBF – kifejezhető a konstans tönkremeneteli rátával. [47]
	$MTBF \approx T = \frac{1}{\lambda}$
MTTR	Szintén a helyreállítható egyedekre vagy rendszerekre alkalmazott mutató, amely a hiba megjelenésétől a megjavításig eltelt közepes időtartam (<i>mean time to repair</i>). Nem a termékre, hanem a hibajavítási és karbantartási folyamatok hatékonyságának mérésére alkalmas.
Készenléti tényező-K	Lényegében egy arányszám; a hasznos működőképesség idejének a működőképességgel és az azt követő helyreállítással eltöltött összes időnek viszonyát fejezi ki.
	$K = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \text{ ,[41]}$
	A fentiek közül valamennyit az egyes egyedek élettartamának, mint természetes valószínűségi változók statisztikáinak tekinthetjük.