



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar**



SZÉCHENYI LÁNCHÍD LÁNCLEMEZEK KORRÓZIÓS ÁLLAPOTÁNAK IDŐBELI VIZSGÁLATA

TDK DOLGOZAT



2023/2024 I. félév

Konzulensek: Dr. Dunai László
Dr. Kövesdi Balázs

Készítette: Szabó Bence
ATV6UK

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	4
2.	A Széchenyi lánchíd története.....	5
2.1	Építésének előzményei, építési munkálatok	5
2.2	Lánchíd átépítései	5
3.	Láncclemezek vastagságmérése a hídon.....	7
3.1	Mérőműszer bemutatása	8
3.2	A mérés menete	9
3.3	1986-os mérések	10
3.4	2002-es mérések	10
3.5	2022-es mérések	11
4.	Mérési eredmények összehasonlítása	13
4.1	A mért lemezvastagságok tendenciájának értékelése	14
5.	Nemzetközi szakirodalomból megismert korróziós károsodási modellek.....	19
5.1	Az áttekintett szakirodalmak összetétele	19
5.2	Korrózió figyelembevétele	19
5.3	Korróziós vizsgálati módszerek.....	20
5.3.1	Analitikus elemzés	20
5.3.2	Numerikus elemzés	21
5.4	Empirikus modell az időfüggő korróziós veszteség előrejelzésére [17]	22
6.	Mérési eredmények kvantitatív értékelése – károsodási modell.....	26
7.	Korróziós modell kidolgozása	31
8.	Széchenyi lánchíd korróziós folyamatának időbeli elemzése.....	34
8.1	Széchenyi lánchíd láncclemezek korrózió elleni védelme	34
8.2	Nincs korrózió elleni beavatkozás 2022-ben.....	35
8.3	Jelenlegi állapot, korrózió elleni beavatkozással 2022-ben.....	36
9.	Korrodált láncclemezek statikai élettartalma.....	40
9.1	Nincs korrózió elleni beavatkozás 2022-ben.....	40
9.2	Jelenlegi állapot, korrózió elleni beavatkozással 2022-ben.....	41
9.2.1	A feltételezés alapján történő elemzés	41
9.2.2	A feltételezésből levont következtetések	42

10. Összefoglaló megállapítások és továbblépési javaslatok.....	43
11. Köszönetnyilvánítás	45
Irodalomjegyzék.....	46
Ábrajegyzék	48
Táblázatjegyzék.....	50

1. Bevezetés

Az acélszerkezetek korrózióvédelmét egész életciklusuk során biztosítani kell, hogy megelőzhető legyen a károsodás és az esetleges tönkremenetel. Rendszeres és jól kivitelezett karbantartással nagy mértékben csökkenthetők a korróziós károsodások. A kialakult korróziós folyamatokba a megfelelő időben történő beavatkozáshoz szükség van korróziós mérésekre, amelyek során előállított adatok alapján extrapolációs számításokat lehet végezni a szerkezetek korróziós folyamatainak időbeli változásának becslésére.

A tavalyi TDK dolgozatomban a Széchenyi lánchíd lánclemezein 2022. évben a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék által végzett korróziós mérések eredményeinek matematikai statisztikai alapú kiértékelésével foglalkoztam, és egy korróziós felületmodellt hoztam létre.

A kutatás folytatásaként ezen geometriai modell és a korábbi két korróziós mérés tendenciáinak felhasználásával megvizsgálom, hogy különböző, a korróziós károsodás időbeli változását becslő modellek alapján a Lánchíd lánclemezek korróziója hogyan prognosztizálható rendszeres karbantartással, illetve karbantartás nélkül.

A már meglévő korróziós modellek megismerése céljából a jelenlegi kutatási munkám során elsőként áttekintem és értékelem a nemzetközi szakirodalomban elérhető korróziós károsodási modelleket. Ezeket is felhasználva elvégzem a Lánchíd lánclemezeire a korróziós károsodás időbeli változásának a számítását.

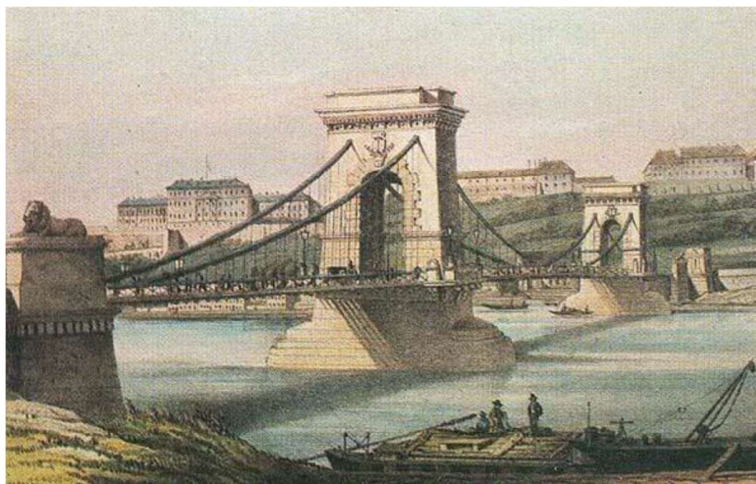
Először bemutatom az 1986-ban, 2002-ben és 2022-ben történt lánclemez vastagságmérés eredményeit, azután ezeket az adatokat matematikai statisztikai alapon összehasonlítom és kiértékelem. A vizsgálat során kitérek a mért lánclemezek elemzésére, a korrózió sebességének időbeli változásának meghatározását viszont a teljes adatbázis adatai alapján végzem el. Ezt követően kiválasztom ezen adatokra legjobban illeszkedő sűrűségfüggvényt, majd ennek a paramétereinek a segítségével becslést teszek a korrózió sebességére. Ezzel becsülhetővé válik, hogy a következő években, évtizedekben hogyan fog változni a híd lánclemezeinek átlagos korróziós állapota különböző karbantartási feltételezések mellett. Az így becsült keresztmetszeti csökkenés alapján megvizsgálom, hogy mikor merülne ki a Lánchíd húzott függesztőelemeinek a teherbírása, a korrózió elleni beavatkozás nélkül, illetve a 2021/2022. évi felújítás figyelembevételével.

2. A Széchenyi lánchíd története

2.1 Építésének előzményei, építési munkálatok

Gróf Széchenyi István nevéhez fűződik a híd megépítésének ötlete, mivel a jégzajlások miatt nem tudott átkelni a Dunán apja temetésére menet. Ezt követően ajánlotta fel egy éves jövedelmét egy Duna-híd építésére Buda és Pest között [1].

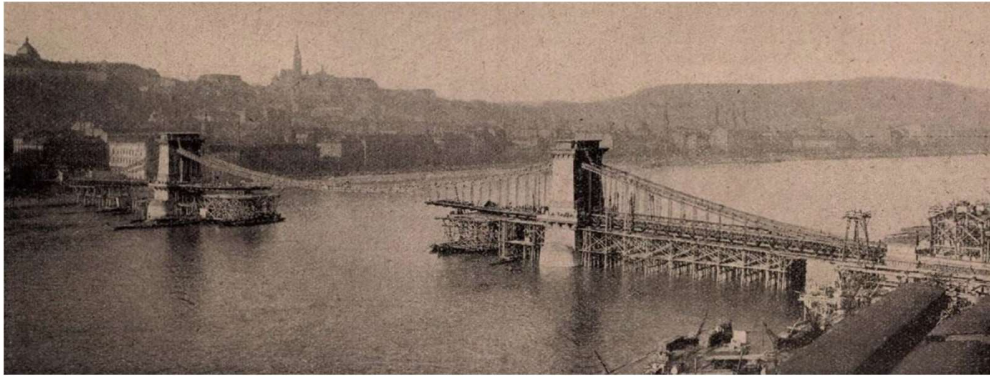
Széchenyi megkeresésére Sina György báró kezelte a Lánchíddal kapcsolatos pénzügyeket. A báró indítványozására William Tierney Clark angol mérnököt kérték fel a híd megtervezéséhez, így a függőhíd tervezési tapasztalatokkal rendelkező szakember tervei alapján kezdődött el az építkezés 1839-ben [1]. Adam Clark skót gépész vezette az építkezést, amely minden munkálatot figyelembe véve tíz évig tartott. Összesen 1000-1200 munkás dolgozott a híd építésén. Az *1. ábra* látható eredeti Lánchidat 1849. november 20-án adták át [2].



1. ábra: Az eredeti Lánchíd [3]

2.2 Lánchíd átépítései

A Széchenyi lánchíd első átépítésére 1913-15. között került sor, ekkor a régi lánclemezeket újakra cserélték, és rácsos merevítőtartót építettek a hídba. A *2. ábra* az átépítés egyik fázisát szemlélteti. A csomópontokba befutó lánclemezek száma is változott: az egyik oldalon 12 db, a másik oldalon 11 db 29 mm vastagságú, míg a lánckötegek két szélén egy-egy 17 mm vastagságú lánclemezt építettek be [4]. Ezek a lánclemezek 7,2 m hosszúak és 380 mm magasak.



2. ábra: A Lánchíd átépítése 1913-15 között [2]

A második világháború végén az összes többi Duna-híddal együtt a Lánchídat is felrobbantották a visszavonuló német csapatok (3. ábra), így a harcok befejezését követően újjá kellett építeni. Legnagyobb mértékben a pesti oldal sérült, ott a lánclemezek elmozdultak, egy részük el is tört, melyeket cserélni kellett. A Dunába került lánclemezek közül sokat újra fel tudtak használni, hiszen a vizsgálatok bizonyították, hogy a láncok szilárdsága nem károsodott. 1949-ben adták át az újjáépített Lánchídat, a híd eredeti átadásának 100. évfordulóján [5].



3. ábra: A felrobbantott Lánchíd [5]

3. Lánclemezek vastagmérése a hídon

Az 1949-es átadást követően 1973-ban végeztek először vizsgálatokat a hídon, aminek eredményeképpen a híd acélszerkezete – köztük a lánclemezekkel – új korrózió elleni bevonatot kapott [1].

Az első részletes vizsgálatra 1986-ig kellett várni, ekkor csatlakozott a Budapesti Műszaki Egyetem Acélszerkezetek Tanszéke is a híddal kapcsolatos munkálatokhoz. Ezen évhez képest 13 évvel ezelőtt kapott új felületvédelmet a híd, viszont már ennyi idő után is beavatkozásokra volt szükség a rozsdásodás ellen, mert a lánclemezeken túl a korlátok, és azok környezetében lévő díszítőelemek is korrodáltak, illetve több balesetveszélyes elemet is felfedeztek a hídon [6].

Egy szerkezet korróziós állapotának megismeréséhez, a korróziós folyamat kiértékeléséhez elengedhetetlen a mérési adatoknak a megléte, ezért első lépésként ki kellett találni azt a módszert, amivel megfelelően és a lehető legpontosabban lehet megmérni a lánclemezek korrodáltságának mértékét a kedvezőtlen mérési adottságok esetén is (szűk lánccsatorna, egymáshoz közel elhelyezkedő lánclemezek).

A Tanszék munkatársai a lánclemezek szelvényfogyásának vizsgálatához egy – csak a Lánchíd lánclemezek vastagságának mérésére szolgáló – egyedi vastagságmérő műszert fejlesztettek ki 1986-ban. Ennek a műszernek a segítségével hajtották végre a méréseket a letisztított lánclemezekon [7]. A lánclemezeket és a mérőműszert mutatja a 4. ábra.



4. ábra: Letisztított lánclemezek és mérőműszer a lánccsatornában [8]

3.1 Mérőműszer bemutatása

A Széchenyi lánchíd lánclemezeinek vastagságát először 1986-ban mérték a Tanszék által kifejlesztett egyedi vastagságmérő műszerrel. Ez a műszer a tapogatóinak segítségével hét párhuzamos vonal mentén előre meghatározott pontokban tudta rögzíteni a lánclemezek vastagságának az értékeit [9].

Ezt követően 2002-ben került sor a lánclemez vastagságok újbóli mérésére. Ekkor a vizsgálatokat a Hidak és Szerkezetek Tanszéknek munkatársai az 1986-ban kifejlesztett célműszer felújításával és újrakalibrálásával, illetve egy korszerűbb számítógéphez való illesztésével kezdték. Az eszköz felújítása során kicserélésre került néhány elhasználódott mérőelem, csökkentették a minimálisan mérhető vastagságot 14 mm-re, továbbá a mérőműszer vezérlőprogramját újraírták, hogy az eszköz az újabb számítógéppel kezelhető legyen. Ezt követően következett a mérőműszer kalibrálása és hitelesítése [9].

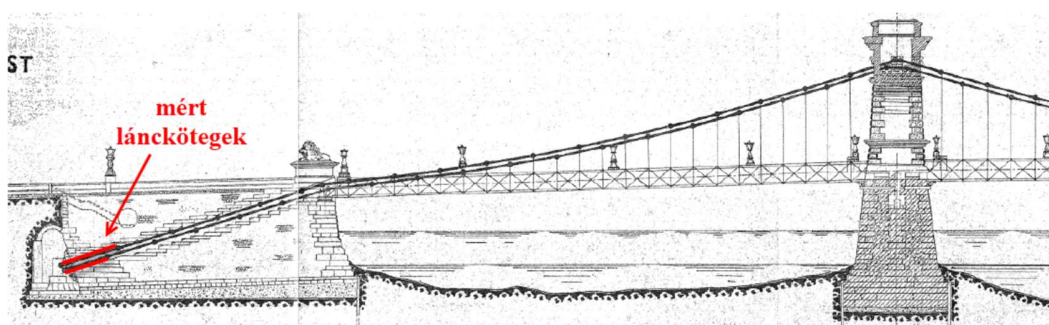
20 évvel később, 2022-ben történtek a következő mérések a híd lánclemezein. Az eszköz mérőrendszerét szintén továbbfejlesztették, így a tavalyi év során egy még korszerűbb technika állt a mérést elvégző szakemberek rendelkezésére. A jelenlegi műszer abban különbözik az előzőtől, hogy ez már rendelkezik egy olyan adatgyűjtő rendszerrel, amely nem csak az előre megadott pontokban tud mérések végezni, hanem a hét mérési vonalon folyamatosan, megszakítások nélkül tud adatot szolgáltatni. Ezáltal sokkal több érték lett rögzítve, amelyekből jobban megállapítható volt a lánclemezek felületének a korrodáltság miatti deformáltsága. A mérőműszert mutatja az 5. ábra [8].



5. ábra: A mérőműszer tapogatófeje [8]

3.2 A mérés menete

A bemutatott mérőeszköz fésűszerűen nyúlik be a lánclemezek közé. Egy lánclemezre végig tolva a lánc magassága mentén a hét mérőszensor segítségével hét mérési vonalon tudja rögzíteni a láncok lemezvastagságának adatait. A hét mérőszensor a névleges 380 mm-es magasságú lánclemez felső élétől 10, 70, 130, 190, 250, 310 és 370 mm távolságban tudja gyűjteni az adatokat. A lánccsatornák leginkább károsodott, utolsó lánclemezeinek a vastagságát a lánckamrákban a lehorgonyzófejektől kezdődő részekben 1,5-2,0 méteres szakaszokon mérték, melyet a 6. ábra szemléltet [8].



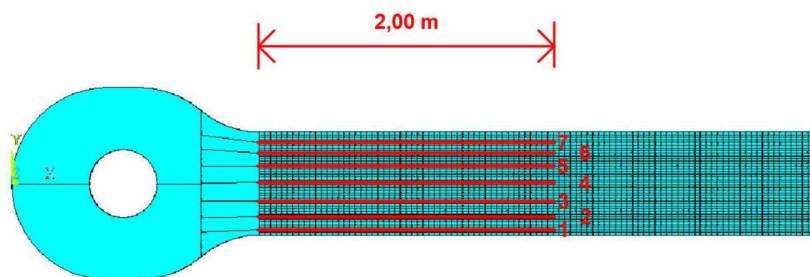
6. ábra: A mérések helye [8]

1986-as mérésekből a lánclemezek maradó keresztmetszeteinek átlagos értékeit tekintve az látható, hogy a budai befolyási oldal alsó lánckötege a legkorrodáltabb, míg ugyanezen oldal kifolyási lánckötegei vannak a legjobb állapotban [9].

2002-ben a lánclemezekben a méréseket a lehorgonyzó szelvénytől 1,5 méteres szakaszokon végezték. A lehorgonyzó szerkezeten belüli szakaszon 5 cm-ként, azon túl 10 cm-ként történtek a mérések. A horgonytömb végéig (100 cm) történtek 5 cm-ként a leolvasások, a fent maradó fél méteres szakaszon pedig 10 cm-ként. A mérési eredményekből egy rasztert állítottak elő [9].

2022-ben két változás is történt a mérés folyamatában. Az egyik az, hogy 1,8-2,0 méteres szakaszokon történt a lánclemezvastagságok mérése. A budai kifolyási oldal lehorgonyzókamrájának alsó lánckötegénél kb. 20 cm-re a lehorgonyzófejtől lehetett elkezdni csak a mérést, mivel ott nem fért be a műszer a lehorgonyzó szelvényhez, így ott rövidebb volt a mérési szakasz. A másik különbség pedig, hogy tavaly már folyamatosan tudott a mérőműszer adatokat rögzíteni a mérési szakaszokon. A 2022. évi mérési zónát és a hét mérőszensor vonalait mutatja a 7. ábra.

Ezen kívül azt emelném még ki, hogy a méréseket oda-vissza tolásokkal végezték, amivel a mérési eredmények megbízhatóságát lehetett érdemben növelni, mivel minden mérési pontra két mérési eredmény állt rendelkezésre. A két mérési eredmény minden esetben jó egyezést mutatott, viszont a nagyobb pontosság elérése céljából ezeket az adatokat átlagolták [8]. A 2022-es mérések egy részén személyesen is részt tudtam venni, hasznos volt látni, hogy hogyan ment végbe egy ilyen mérési folyamat.



7. ábra: Mérési vonalak és mérési zóna sematikus ábrája – 2022

3.3 1986-os mérések

A mért adatokból meghatározták az átlagos, illetve a teljes keresztmetszeti gyengítést a teljes lánckötegre nézve. A négy lánckamrát vizsgálva az volt megállapítható, hogy a budai oldal északi (befolyási) kamrájában lévő lánckötegek korrodáltak a legnagyobb mértékben, ezek közül is az alsó láncköteg volt a legrosszabb állapotban. Ebben a kamrában 7,5-9,0%-os átlagos fogyás volt mérhető, míg a többi kamrában 5% alattiak voltak a mért szelvényfogyás értékek. A megadott értékek a névleges keresztmetszet százalékában értendők, és az 1. táblázatban láthatóak [9].

A névleges keresztmetszet 91%-a volt a mért legkisebb keresztmetszet (budai oldal alsó láncköteg), viszont a mérés pontatlanságával is kompenzálva az 1986-os jelentés azt javasolta, hogy az ellenőrző statikai számításokban a lánclemezek korrózióval gyengített tényleges keresztmetszetét a névleges keresztmetszet 90%-ában vegyék fel [9]. A vizsgálatok után a híd acélszerkezete ennek a felújításnak a végén is új korrózió elleni védőbevonatot kapott.

3.4 2002-es mérések

A hét mérési vonalon mért adatok súlyozott átlagából és a 380 mm-es lemezvastagságból számolták ki először minden lánclemez keresztmetszeti területeit, majd azok átlagát. Ilyen

eredmények az 1986-os mérésből is voltak, így ezek összehasonlíthatóak. Egyszerűen megállapítható, hogy minden lánckötegnél nagyobb fogyás tapasztalható a 1986-os értékekhez képest. A legnagyobb különbség a pesti befolyási oldal felső lánckötegénél figyelhető meg, ott csaknem 8%-kal kisebb a maradó keresztmetszet átlaga a névlegeshez képest (97,9% – 90,3%). Ami hasonlóság, hogy a legrosszabb állapotban szintén a budai befolyási oldali lánckamra volt, ebben az évben viszont a felső lánckötegen nagyobb átlagos fogyást figyeltek meg, mint az alsón. Ez alapján 87%-os névleges keresztmetszetet lehetett volna ajánlani a statikai számításokhoz. Mivel azonban csak előre meghatározott pontokban ismerték a mérési adatokat, ezért figyelembe kellett venniük annak az eshetőségét, hogy lehet olyan nem mért keresztmetszeti rész, amelynek a területe kisebb, mint a kiválasztott minimumok. Emiatt a mért adatokat normális eloszlásnak megfelelő feltételezéssel elemezték. Ennek eredményeképpen megállapítható volt, hogy az *1. táblázatban* közölt adatok 95,5%-os valószínűséggel a számításba veendő keresztmetszet csökkenés értékét adják meg. Ezen vizsgálatok után is azt állapították meg, hogy névleges keresztmetszet 87%-át vegyék fel a következő statikai számításoknál, viszont megjegyezték, hogy a lehorgonyzófejtől 22 mm-re tudták csak elkezdni a méréseket, és azt tapasztalták, hogy azon a nem mért 22 mm-eken tovább csökkent a keresztmetszet, ezért a végső javaslatuk az volt, hogy teherbírás ellenőrzése a névleges keresztmetszet 85%-os vastagságával legyen számolva [9]. A vizsgálatok után 2002-ben is megújult a lánclemezeknek a korrózióvédelme.

3.5 2022-es mérések

Az eredmények közvetlen összehasonlíthatósága végett a tavalyi mérések is azonos helyeken, azonos eszközzel, mérési stratégiával és kiértékelés szerint történtek. Ahogy a 2002-es méréseknél is megfigyelhető volt, úgy 2022-ben is a legnagyobb szelvényfogyás a lánclemezek lehorgonyzófejénél lévő keresztmetszeteiben volt tapasztalható, ezt szemlélteti a *8. ábra*. Ebben az évben a mérőműszer a budai kifolyási oldal alsó láncköteget kivéve minden láncköteg esetén be tudott nyúlni a lehorgonyzó szelvényig, így a mért adatokon is jól megfigyelhetőek a nagyobb fogyások ezeken a helyeken [8].



8. ábra: Lánclemezek jellemző képe a lehorgonyzó szelvénynél [8]

Ezek a nagyobb lemezfogyások majdnem az összes lánclemezre igazak voltak, viszont általában csak a szélső vonalat érintették. Ezek hatása megjelenik az átlagos lemezfogyás értékeknél [8].

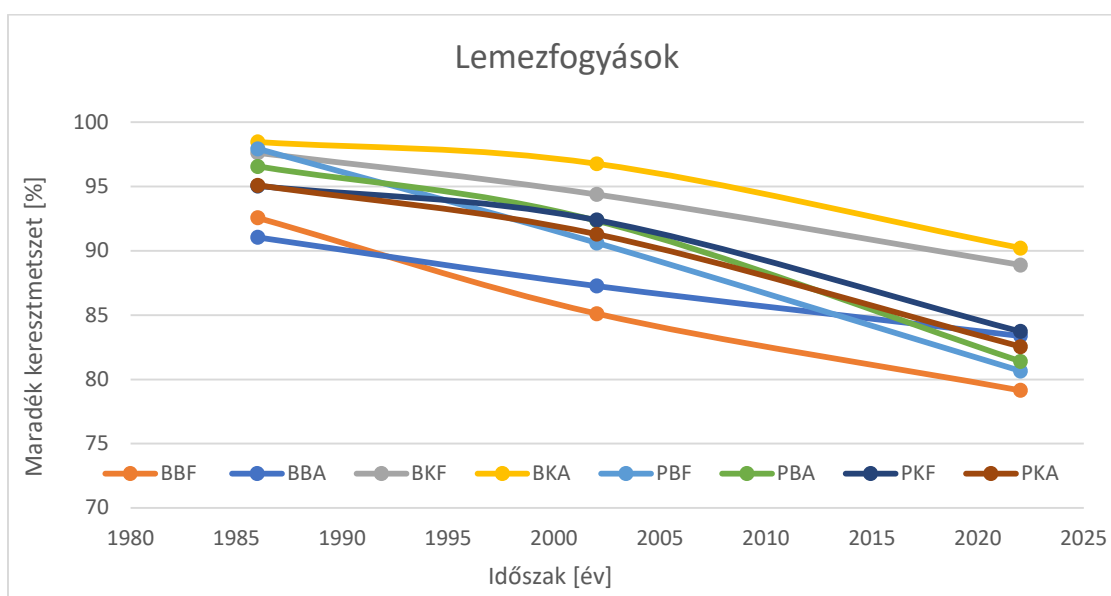
Az 1. táblázatban feltüntetett eredmények alapján jól megfigyelhető, hogy jelentős mértékű a lánclemezek szelvényfogyása a 2002-es eredményekhez képest is. A legjobban korrodált láncköteg a budai befolyási oldal felső lánckötege, ugyanúgy, mint 2002-ben is. Nem sokkal maradnak el tőle a pesti oldali lánckamrák lánckötegei sem. Valamennyi mérés esetén a budai kifolyási oldal lánckötegei bizonyultak a legkevésbé korrodálnak [8]. A táblázat mind a nyolc láncköteg korrózió miatt csökkent keresztmetszetének az átlagértékeit mutatja a névleges keresztmetszethez képest százalékos formában.

			1986	2002	2022
Buda	befolyás	felső	92,57	85,12	79,14
		alsó	91,04	87,27	83,38
	kifolyás	felső	97,62	94,39	88,90
		alsó	98,47	96,78	90,21
Pest	befolyás	felső	97,94	90,61	80,66
		alsó	96,56	92,35	81,41
	kifolyás	felső	95,05	92,40	83,72
		alsó	95,09	91,28	82,55

1. táblázat: Korrózió miatt csökkent keresztmetszetek átlagértékei a névlegesekhez képest

4. Mérési eredmények összehasonlítása

A 9. ábra jól megfigyelhető, hogy a Lánchíd lánclemezeinek korrodáltsága az évek során egyre nőtt. Az 1. táblázat alapján összeállított diagram jól szemlélteti, hogy az idő folyamán hogyan változnak a maradó keresztmetszetek átlagos értékei az eredeti keresztmetszetekhez képest. A vízszintes tengelyen az időtartam látszik évben kifejezve, míg a függőleges tengely a maradó keresztmetszet százalékos értékeit tartalmazza az eredetihez képest. A nyolc vonal a nyolc láncköteget szimbolizálja, a jelmagyarázatban a rövidítések pedig rendre a lánckötegek azonosítására – az előzőekben is – használt kifejezések rövidítve. Így például a BBF a budai befolyási oldal felső lánckötegeire utal.



9. ábra: Korrózió miatt csökkent keresztmetszetek átlagértékei a névlegesekhez képest

A 2022-es mérések alapján a budai kifolyási oldal alsó és felső lánckötegetől eltekintve a másik hat esetben a maradó keresztmetszet a névleges keresztmetszethez képest egyik láncköteg esetén sem éri el a 85%-ot.

Ezek az eredmények is alátámasztják a híd 2021-23. közötti felújításának szükségességét és fontosságát. Ezen időszak alatt a híd teljes acélszerkezete új korrózió elleni bevonatot kapott, amely, ha nem is tudja leállítani teljes mértékben a korrózió terjedését, de bizonyos időszakig megfékezi a gyors előrehaladását.

Az eddig ismeretek alapján az alábbi kérdések fogalmazódhatnak meg:

- Milyen következtetéseket lehet levonni az 1986-os, 2002-es, illetve 2022-es mérések adatainak kiértékeléséből, összehasonlításából?
- Mikor merült volna ki a Lánchíd lánclemezeinek a teherbírása, ha nem lett volna a 2022-es felújítás?
- Várhatóan mikor kell majd újra beavatkozni a híd életébe a jelenlegi felújítást követő időszakban lánclemezek korróziója miatt?

Ahhoz, hogy válaszolni lehessen ezekre a kérdésekre először ki kell értékelni a három évben mért lemezvastagság adatokat. Az eredmények összehasonlításáról az előző bekezdésben volt szó, illetve az *1. táblázat* szemléltette is számszerűen a maradó keresztmetszeti adatokat. A továbbiakban az egyes lánckötegekben lévő lánclemezek korrodáltságának tendenciáit fogom összehasonlítani.

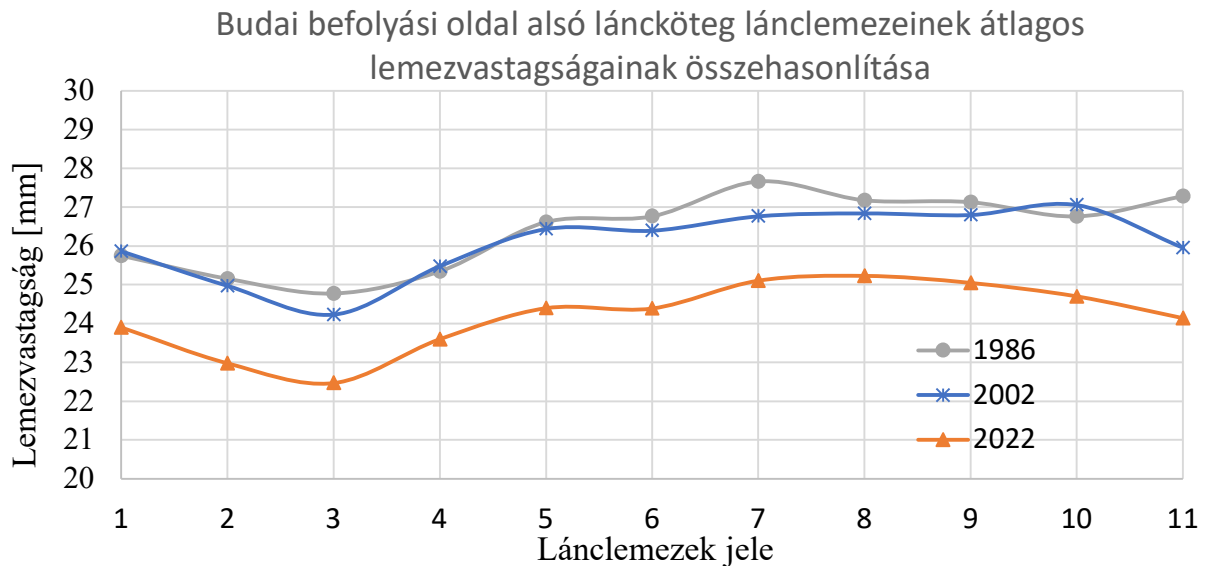
4.1 A mért lemezvastagságok tendenciájának értékelése

A mindhárom mérési évben készült jelentések beszámoltak a lánclemez vastagságok mért értékeiről. 1986-ból csak az egyes lánclemezek átlagos fogyása volt feltüntetve, 2002-ből a előre meghatározott pontokban történő mérés értékei és az átlagos fogyások. 2022-ben a folyamatos mérés eredményeképpen nagyon sok adatot szolgáltatott a mérést végző szakemberek, de itt is ki lettek számolva az átlagos fogyások értékei az egyes lánclemezek esetében.

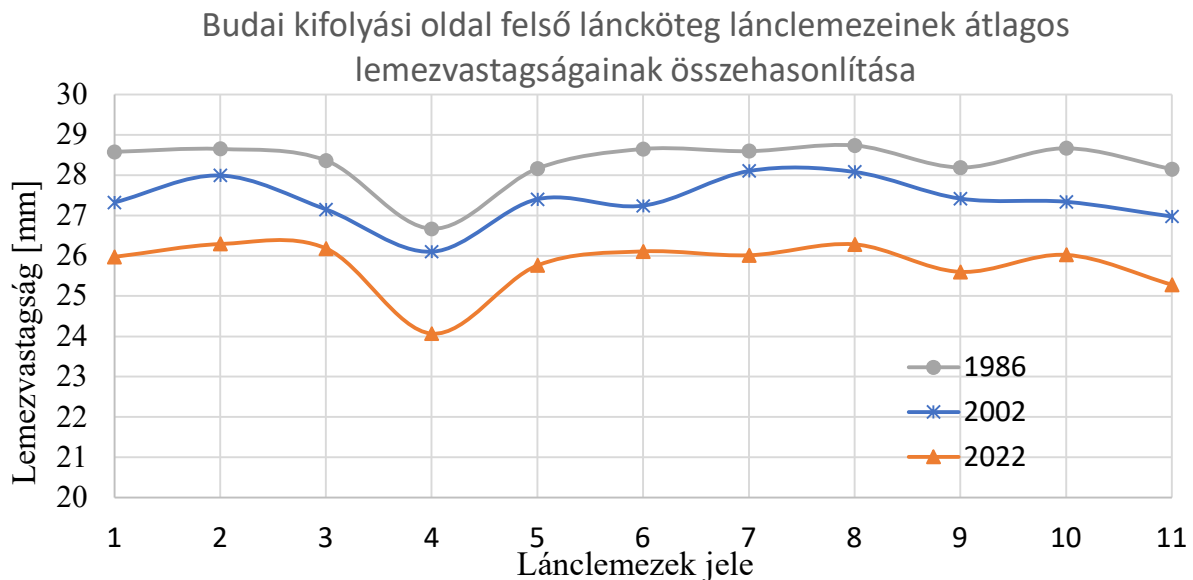
Itt szeretném megjegyezni, hogy minden mérés a letisztított lánclemezeken történt, és minden mérés után korrózió elleni védőbevonat lett felhordva a lánclemezekre.

Mivel 1986-ban csak az átlagok voltak megadva, így az összes mérést tekintve ezekkel az adatokkal dolgoztam tovább. Fontos megjegyezni, hogy ezek az átlagok az egyes lánclemezek hét mérési vonalán mért vastagságok minimum adatainak az átlagértékei. Mindhárom jelentésben ezek az adatok is közölve voltak, így közvetlenül össze tudtam őket hasonlítani. Ehhez minden egyes láncköteg lánclemezeinek – a mérési adatok alapján kiszámolt – átlagos lemezvastagságát ábrázoltam egy-egy diagramon. Ezek közül mutatok be néhány jellemzőt a *10. ábra*. A diagramok vízszintes tengelye a lánclemezek jelét mutatja, a függőleges tengely pedig az átlagos lemezvastagság értékeit adja meg milliméterben. A lánclemezek jele (1, 2, ...11) a lánclemezek számozását jelöli a befolyási oldaltól (északról) kezdődően.

A legtöbb láncköteg esetében nagyon jól látszanak a trendek, ilyen például a budai befolyási oldal alsó lánckötegének vagy a budai kifolyási oldal felső lánckötegének adatai. Az ezekről készült diagramokat mutatják a 10. ábra.



10. ábra: Budai befolyási oldal alsó láncköteg lánckötegeinek átlagos lemezvastagságai

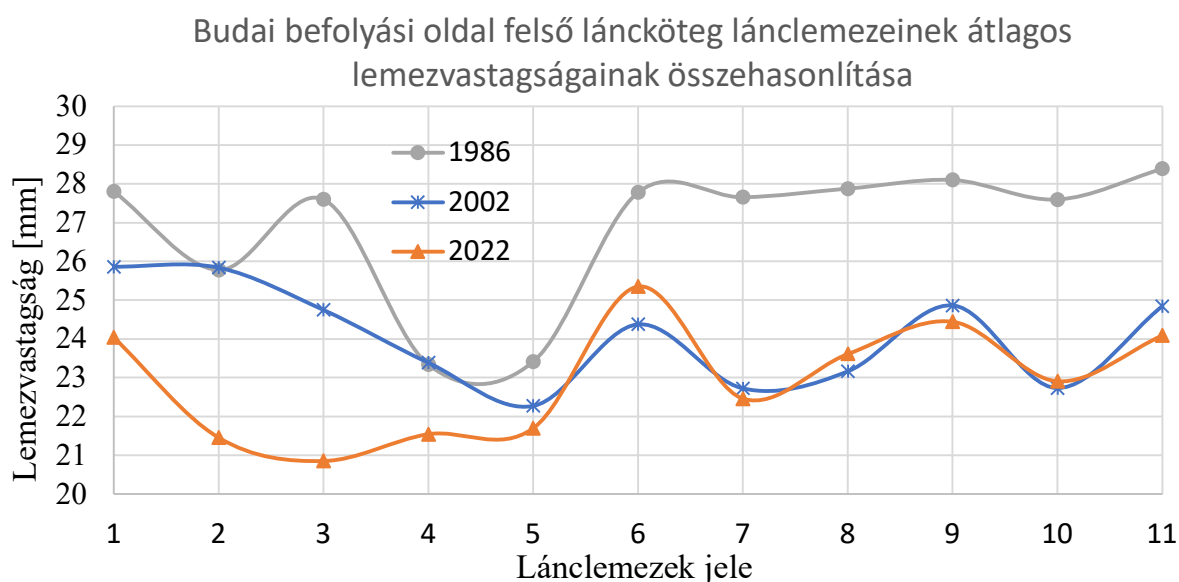


11. ábra: Budai kifolyási oldal felső láncköteg lánckötegeinek átlagos lemezvastagságai

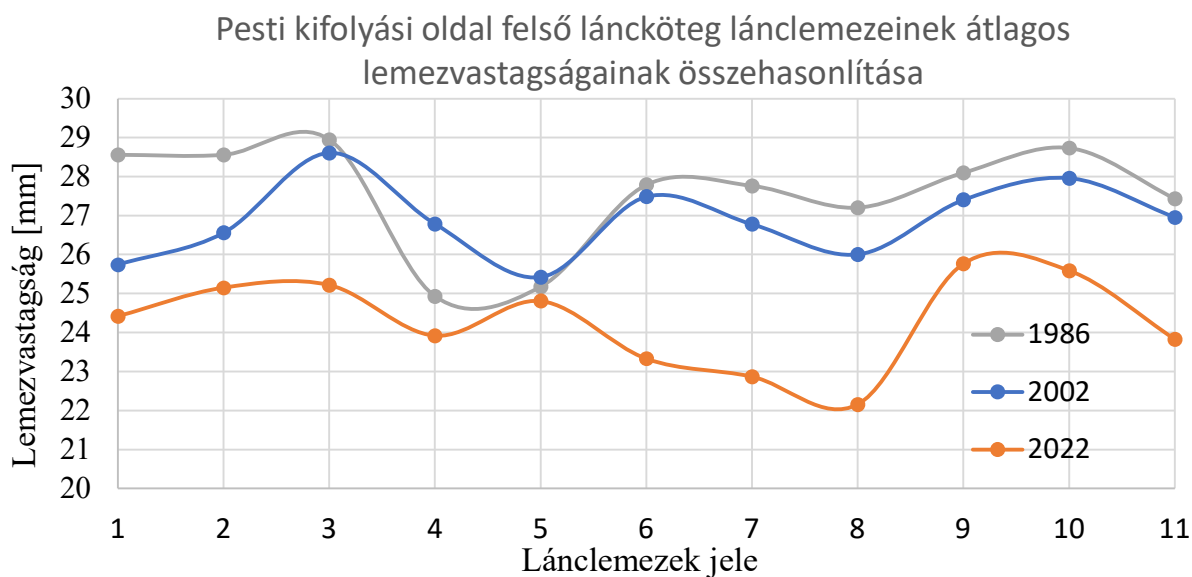
Jól látható az ábrákról, hogy mindhárom évben a budai befolyási oldal alsó lánckötegét tekintve a harmadik lánckötegen, míg a budai kifolyási oldal felső lánckötegét nézve a negyedik lánckötegen

mérték a legkisebb lemezvastagság értékeit. A mérési adatokról az is egyértelműen látható, hogy a szelvényfogyás mértékének növekedése 1986-2002 között jelentősen kisebb volt, mint 2002-2022 között. Ennek oka többek között az lehet, hogy 1986 és 2022 között 16 év telt el, aminek egy részében hatékonyan működött a korrózióvédelem – ekkor nincs szelvényfogyás –, majd a korrózióvédelem károsodásával indul el a korróziós folyamat, ami 2002 és 2022 között 4 évvel hosszabb volt. Ez jelentősen nagyobb szelvényfogyási többletet tudott előidézni a szerkezeten.

De a kiértékelés során találtam olyan diagramokat is, melyeken valamiféle szabálytalanság figyelhető meg az adatsorok trendjeiben. Ezeket szemlélteti a 12. ábra/13. ábra.



12. ábra: Budai befolyási oldal felső láncköteg lánclemezeinek átlagos lemezvastagságai



13. ábra: Pesti kifolyási oldal felső láncköteg láncclemezeinek átlagos lemezvastagságai

A 12. ábra jól látszik, hogy a 4-es és az 5-ös jelű láncclemez esetén szinte azonosak a mérési eredmények úgy, hogy máshol pedig 2-3 mm-es eltéréseket lehet tapasztalni. Ezentúl az is megfigyelhető, hogy a 6-os jelű láncclemeztől a 11-esig váltakoznak a 2002-es, illetve a 2022-es években mért adatok.

A 13. ábra is megfigyelhető a 4-es és 5-ös jelű láncclemezek esetében, hogy nagyon közel vannak egymáshoz az eredmények, mindkét esetben nagyobb vastagságot mértek 2002-ben, mint 1986-ban, amikből valamilyen mérési hibára lehet következtetni.

Ezek a bizonytalanságok abból adódhatnak, hogy míg 1986-ban és 2002-ben csak előre meghatározott pontokban történt a mérés, addig 2022-ben folyamatosan pásztázva voltak a láncclemezek felületei. A tavalyi mérést megelőző vizsgálatok során könnyen megeshetett az, hogy a mért a keresztmetszet nem a legkisebb keresztmetszet volt az adott intervallumon belül, és így nem a tényleges átlagos értéket mutatja az adatokból számított érték.

Ezeket a bizonytalanságokat leszámítva mind a nyolc láncköteg esetében jól követhetőek az átlagértékek alapján összeállított diagramokon látható korróziós fogyási trendek. Az összehasonlítás alapján jól látható tendenciákból arra lehet következtetni, hogy ezek az adatok megfelelőek lesznek a korróziós sebesség statisztikai alapú becslésére. Ahhoz viszont, hogy minél

pontosabban tudjam elvégezni a az eredmények kvantitatív módon történő értékelését, elsőként bemutatom a nemzetközi szakirodalom kutatásom részleteit.

5. Nemzetközi szakirodalomból megismert korróziós károsodási modellek

Mielőtt elkezdtem volna az adatok kiértékelésével foglalkozni, áttekintettem, hogy nemzetközi szinten hogyan vizsgálják a korrodált acél szerkezeteket, milyen kísérleteket hajtanak végre a próbatesteken, milyen modelleket használnak a korrózió időbeli változásának leírásra. Ezeket a publikációkat nemcsak a jelenlegi TDK kutatásomhoz gyűjtöttem össze és elemeztem, hanem a további kutatásaim háttéréül is. A legtöbb áttekintett szakirodalom legalább egy-egy része egyezett az én általam vizsgált Széchenyi lánchíd lánclemezeinek a korróziós folyamatával és a mérési adatok elemzésével. Természetesen voltak olyan modellek is ([10], [11], [12], [13]), melyek a korrózióval foglalkoztak ugyan, de eltérő szemszögből és más módszerekkel vizsgálták a szerkezeteket. A továbbiakban a számomra – a jelenlegi és a további tervezett kutatás szempontjából – legrelevánsabbnak ítélt szakirodalmi előzményeket mutatom be, majd a fejezet végén részletesebben ismertetem azt a cikket, amelyet nagyon jól fel tudtam használni a TDK kutatásom során.

5.1 Az áttekintett szakirodalmak összetétele

Az átnézett korróziós károsodási modellek között több olyan is volt, amelyben tengeri környezetnek kitett acélszerkezeteket vizsgáltak [14], [15], [16], [17]. Ezek között volt, amelynél szekrénytartóból kivágott próbatesteken kísérleteztek [16], egy korrodált híd gerendáit elemezték [14], vagy a korrodált acéllemez felületek statisztikai jellemzőit vizsgálták [15]. Ezeken túl – de maradva a tengeri környezetnél – találtam olyan szakirodalmat is, mely a korrózió időbeliségére fókuszált [17]. Többféle anyagjellemzőjű acélokat is tanulmányoztak: elemezték 0,2% széntartalmú acélból készült rácsos tartó gerendáit [18], illetve nyomon követték Q235-ös anyagú acéllemezek fáradási viselkedését [19] és mechanikai tulajdonságait is [20]. Átnéztem olyan kutatást is, amelyben egy rácsos távvezeték tartó oszlop egyenlőszárú szögacéljainak korrodáltságát vizsgálták [21].

5.2 Korrózió figyelembevétele

A különböző kutatások során az egyes szerkezetek korrózióját a szerkezeti vagy a környezeti adottságoktól függően különféle módszerekkel elemezték.

Általánosságban elmondható, hogy szinte az összes esetben a korrodált próbatesteket megtisztították a rozsdától, hogy könnyebben mérhető legyen a felületük. Az egyik ilyen kutatás során [16] az egyik mintát homokfúvással, míg a másikat csiszolópapírral tisztították meg, a harmadikat pedig meghagyták eredeti korrodált állapotában. Ezen kívül is több kísérletnél végeztek vizsgálatokat a korrodált elemeken is, a sok megtisztított elem mellett.

Két esetben [19], [20] is sós oldatot/permetet használtak a korrózió mesterséges gyorsításához. A sóval történő gyorsítások mellett áttekintettem egy olyan modellt is [15], amelynél több hónapig/évig víz fröccsenésnek, árapálnak vagy vízbemerítésnek voltak kitéve a próbatestek.

Három esetben is [18], [19], [20] a megtisztított felületek geometriáját, karakterisztikájának méréséhez háromdimenziós felületvizsgáló szkennert alkalmaztak.

5.3 Korróziós vizsgálati módszerek

5.3.1 Analitikus elemzés

Több olyan kutatást tanulmányoztam, amelyeknél a próbatestek felületi jellemzői alapján készítették a vizsgálatokat, voltak olyanok, amiken feszültségvizsgálatokat készítettek, de akadtak olyanok, melyeket statisztikai alapon elemeztek.

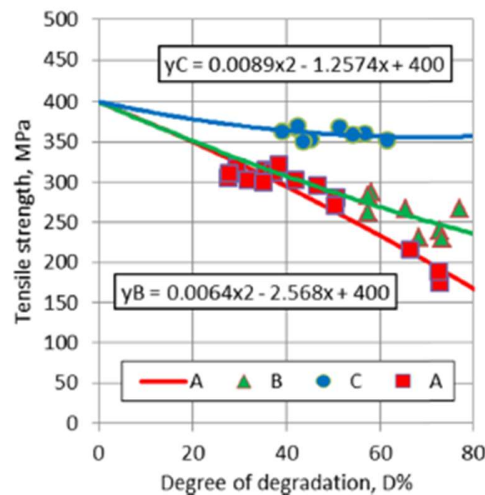
Abban a szakirodalomban [14], mely egy 75 éves acél hídszerkezet egyik elemét kutatta, húzó vizsgálatokat végeztek. A törés vagy a kisebb átlagos vastagsággal rendelkező keresztmetszetben következett be, vagy a hosszanti irányban mért minimális vastagságnál.

A három tengeri jelenségnek kitett próbatest esetén [15] a korrodált acéllemez felületek statisztikai jellemzőit valószínűségszámítási módszerekkel vizsgálták. A tapasztalt adattrendek alapján úgy gondolják, hogy az ő általuk használt módszer sokkal hosszabb időre is megfelelő lenne nemcsak a vizsgált 2,5 évre.

A 0,2% széntartartalmú acélból készült gerendákat vizsgáló szakemberek [18] azt állapították meg a vizsgálat után, hogy a teherbírásveszteség egyenes arányos a minták térfogatveszteségével.

A fáradási vizsgálatoknál [19] a próbatesteket kísérleti alapon vizsgálták a korrózió mértéke kapcsán, illetve egy számítást készítettek arra, hogy hogyan hat a korrózió a fáradási élettartamra. Arra a következtetésre jutottak, hogy a korrózió nagymértékben befolyásolja a fáradási élettartamot, mivel, ha a felület érdesebb lesz, a fáradási élettartam csökken.

A szekrénytartós homokfúvással, csiszolópapírral tisztított esetben szakítópróba alapján állapították meg a próbatestek anyagi tulajdonságait, és arra a következtetésre jutottak, hogy a szakítószilárdság a homokfúvással tisztított próbatest esetén csökken jobban [16]. Ezt mutatja a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található..** A piros négyzetek a nem tisztított, a zöld háromszögek a homokfúvott, míg a kék körök pedig a csiszolópapírral tisztított mintát jelzik.



14. ábra: Szakítószilárdság értékek a degradáció fokának függvényében [16]

A felületi topográfián alapuló korrodált acélok mechanikai jellemzőinek degradációját kutató szakirodalom [20] monoton szakítóvizsgálatokat végzett a feszültség-nyúlás görbék előállításához, illetve a mechanikai tulajdonságok megismeréséhez.

A rácsos távvezeték tartó oszlop egyenlőszárú szögacéljainak vizsgálata során [21] a korróziót vastagság csökkenéssel vették figyelembe, és arra jutottak, hogy egyetlen paraméter nem elegendő a korrózió hatásának figyelembevételére a maradó teherbírás meghatározásához.

5.3.2 Numerikus elemzés

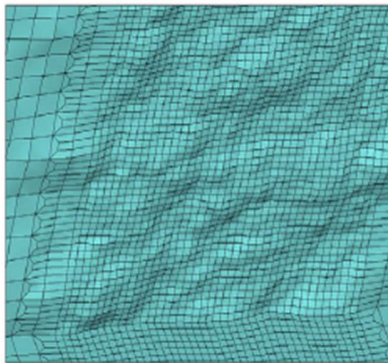
Az átnézett szakirodalmak közül csak néhány esetben készítettek numerikus vizsgálatot az analitikus mellett.

Az egyik ilyen volt a rácsos távvezeték tartó oszlop egyenlőszárú szögacéljaival foglalkozó kutatás [21], ahol a numerikus vizsgálatokkal a korróziós paraméterek együttes hatásának elemzése folyt a kihajlási jelenségekre, illetve a várható végső tönkremeneteli mód előrejelzése történt meg. A

kutatás konklúziójaként azt emelték ki, hogy a javasolt módszer alkalmazható olyan korrodált elemek vizsgálatához, melyeket le lehet írni a tanulmányban ismertetett korróziós paraméterekkel.

Q235-ös acéllemezek [20] mechanikai tulajdonságait numerikus modellekkel is vizsgálták, melyek valós felületi topográfián alapultak. Geomagic Studio és Ansys segítségével szimulálták az acéllemez mechanikai tulajdonságait, és vizsgálták a korróziós kráterek miatt kialakuló feszültségkoncentrációkat az acéllemezekben. Az eredményekből azt állapították meg a numerikus szimuláció jól működik a kísérleti eredményekkel összehasonlítva.

Ansys szoftver segítségével készült numerikus modell a 0,2% széntartalmú acélgerendákat vizsgáló kutatás [18] esetében is. A numerikus szoftverben használt felületet mutatja a 15. ábra.



15. ábra: A vizsgálatok alapján létrejött felületmodell Ansys környezetben [18]

A vizsgálatok eredményei alapján a kutatók arra a következtetésre jutottak, hogy a korrózió a teherbírás jelentős csökkenését okozza. A nem egyenletes térfogatvesztéssel rövidebb lett a folyási plató. A repedések általában nem a keresztmetszet közepétől, hanem a korróziós kráterek felszínéről, illetve aljáról indultak el [18].

5.4 Empirikus modell az időfüggő korróziós veszteség előrejelzésére [17]

A [17]-es szakirodalomban a témához kapcsolódó kiértékelési módszert találtam. Ez a kutatás 11 és 27 év közötti hajók tengervíz ballaszt tartályszerkezeteinek korrózióját vizsgálja, melynek időbeli változására egy empirikus modellt fejlesztenek ki.

Valamennyi vizsgált időpontban a korróziós veszteségek statisztikai szórása széles tartományban mozog, viszont a szórás meghatározása nagyon lényeges, hiszen befolyásolja a korróziós modell pontosságát. Ebben a módszerben a korróziós veszteség statisztikai szórását több időpontban

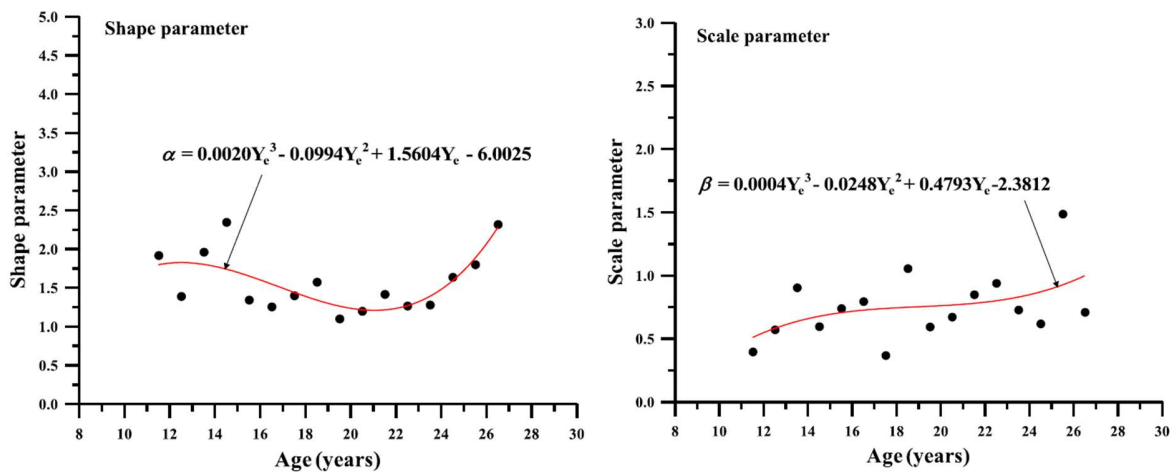
felmérték, és ezek alapján egy időtől függő Weibull-függvénnyel jellemezték az alábbi egyenlet alapján.

$$d_c = \frac{\alpha}{\beta} * \left(\frac{Y_e}{\beta}\right)^{\alpha-1} * e^{[-(\frac{Y_e}{\beta})^\alpha]} \quad (1)$$

Az egyenlet paraméterei a következők: d_c - a korróziós mélység, Y_e - a bevonat lebomlását követő idő években, amely számítható a szerkezet életkora és a bevonat élettartama különbségeként is, α - alak paraméter, β - arányossági paraméter.

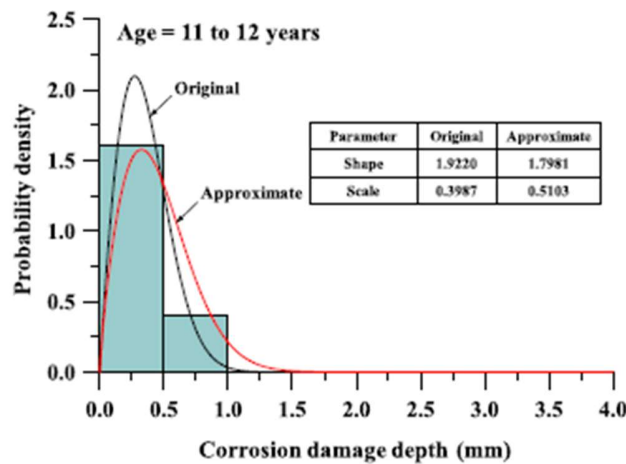
A meglévő empirikus korróziós modellek nem veszik figyelembe a valószínűségi sűrűségeloszlást, ezért ebben a kutatásban kísérletet tettek arra, hogy kifejlesszenek egy módszert ennek a hiányosságnak a kiküszöbölésére.

A modellalkotás első lépése az eltérő korróziós időpontokban történő adatok gyűjtése volt a korrodált szerkezeten. Ezt követően ezek az adatok egy statisztikai elemzésen estek át, ahol megállapításra került a korróziós károk átlagértéke és szórása. Ezután kezdődött meg a sűrűségfüggvény felvétele a statisztikai elemzés eredményei alapján. A következő lépésben ezen függvény együtthatóit definiálták. Elsőként az eredeti adatok alapján meghatározott alak- és arányossági paraméterek alapján összeállítottak a két paraméterre egy-egy diagramot. A felvitt adatokra illesztettek egy-egy függvény, amely az alak- és az arányossági paramétereknek volt a közelítő függvénye a szerkezet életkorának függvényében (a bevonat élettartamával nem foglalkoztak). Ezeket a diagramokat mutatja a 16. ábra.



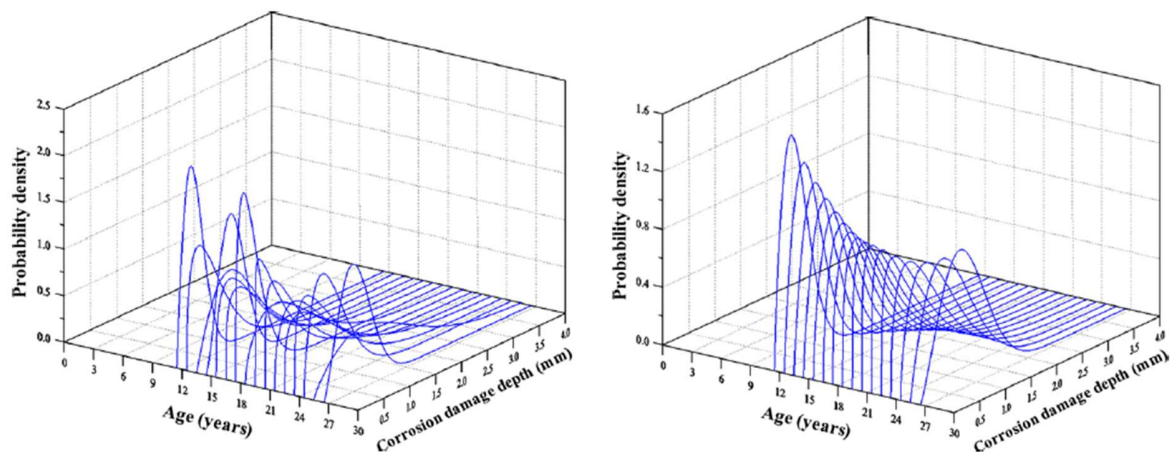
16. ábra: Az alak- és arányossági paraméterek a vizsgált hajó életkorának függvényében [17]

Ezt követően minden egyes évpárra előállították az eredeti és a közelítő görbéket, mely diagramok a korróziós mélység [mm] valószínűségi eloszlását adják meg. Ezzel együtt kiszámolták a közelítő alak- és arányossági paramétereket is. Egy ilyen diagramot mutat a 17. ábra.



17. ábra: Az alak- és arányossági paraméterek meghatározása 11-12 éves korban [17]

Végezetül ezen együtthatók alapján a korróziós empirikus modell kifejlesztése zárta a folyamatot. Fontos megjegyezni, hogy minden lépést az egyes időpontokban külön-külön meg kellett csinálni. Az eredeti idő – korróziós mélység grafikon közel azonos volt a modell alapján kapott diagrammal, mivel a modell tekintettel van a valószínűségi sűrűségeloszlási minták időbeli alakulására. Ezeket a diagramokat szemlélteti a 18. ábra.



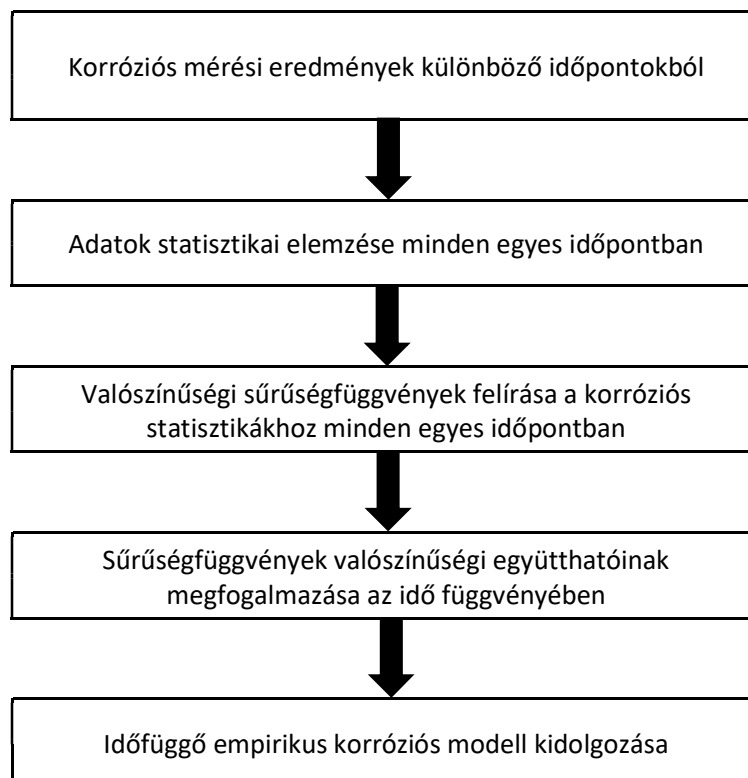
18. ábra: Az eredeti-, illetve a közelítő valószínűségi eloszlás korróziós mélység diagramok az évek függvényében [17]

A korróziós kráterek statisztikai elemzése azt mutatta, hogy acélszerkezetek esetén a Weibull-típusú függvény a legalkalmasabb a korróziós krátermélység valószínűségi eloszlásának ábrázolására.

Ez a javasolt módszer számomra is hasznos, mivel képes figyelembe venni a valószínűségi sűrűség eloszlását az idő függvényében, és ezzel a korróziós károsodás előrejelzése elvégezhető. A kutatásom folytatásában ezen eljárást fogom adaptálni a Széchenyi lánchíd lánclemezeinek korróziós fogyásának időbeli vizsgálatához.

6. Mérési eredmények kvantitatív értékelése – károsodási modell

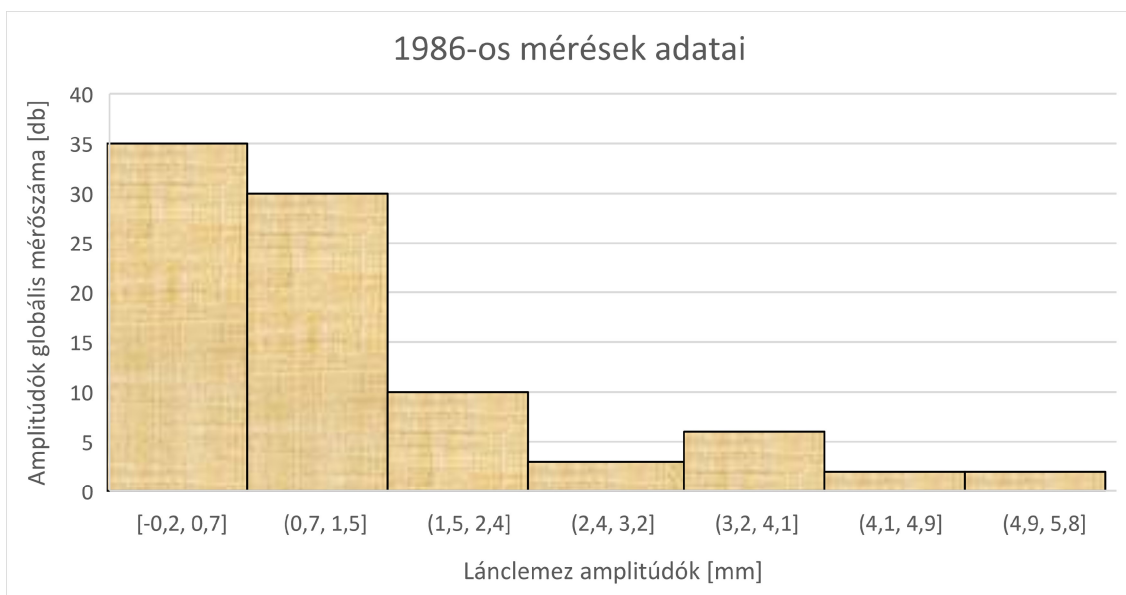
Az adatok szisztematikus feldolgozását és a szakirodalmi áttekintést követően egy statisztikai elemzést hajtottam végre. A kiértékelés módszerét a szakirodalom alapján határoztam meg, melyet a 19. ábra szemléltet.



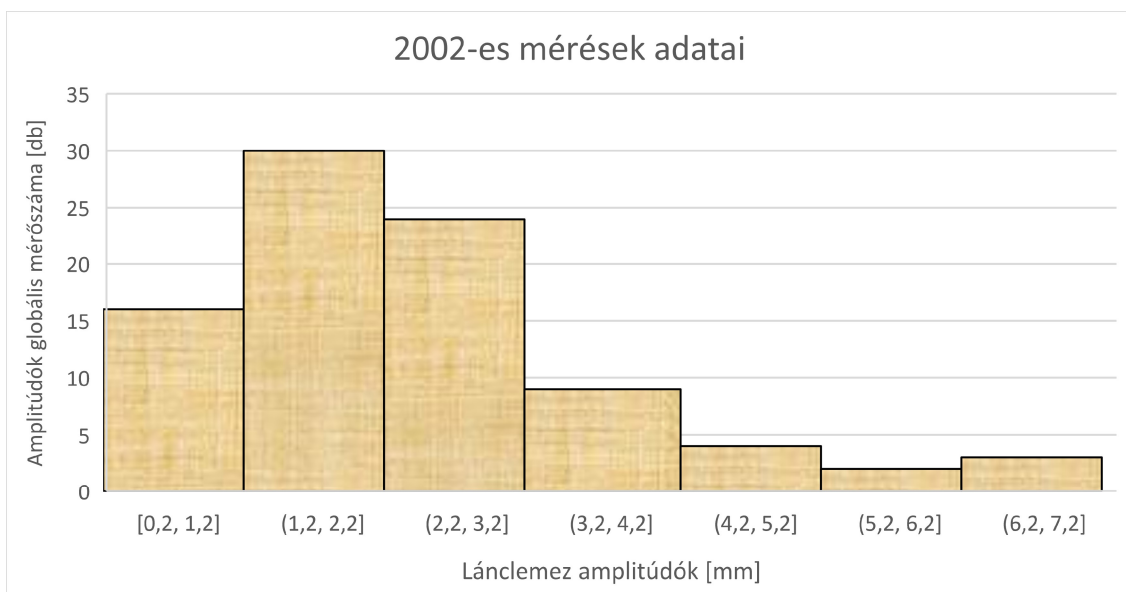
19. ábra: A korróziós modellalkotás folyamata

Első lépésként a mért adatok segítségével előállítottam minden egyes lánckötegre az átlagos amplitúdó értékeket. Egy lánclemez névleges vastagsága 29 mm, ennek a vastagságnak a csökkenését mérték az évek során a szakemberek, így a mérési eredmények a korrózió miatt csökkent lánclemezvastagságokat adják vissza. Az amplitúdók (fogyások) a névleges vastagságok és a mért vastagságok különbségét jelentik. A továbbiakban ezen szavakra (amplitúdó, fogyás) lokális értelemben kráterméltségként is hivatkozni fogok.

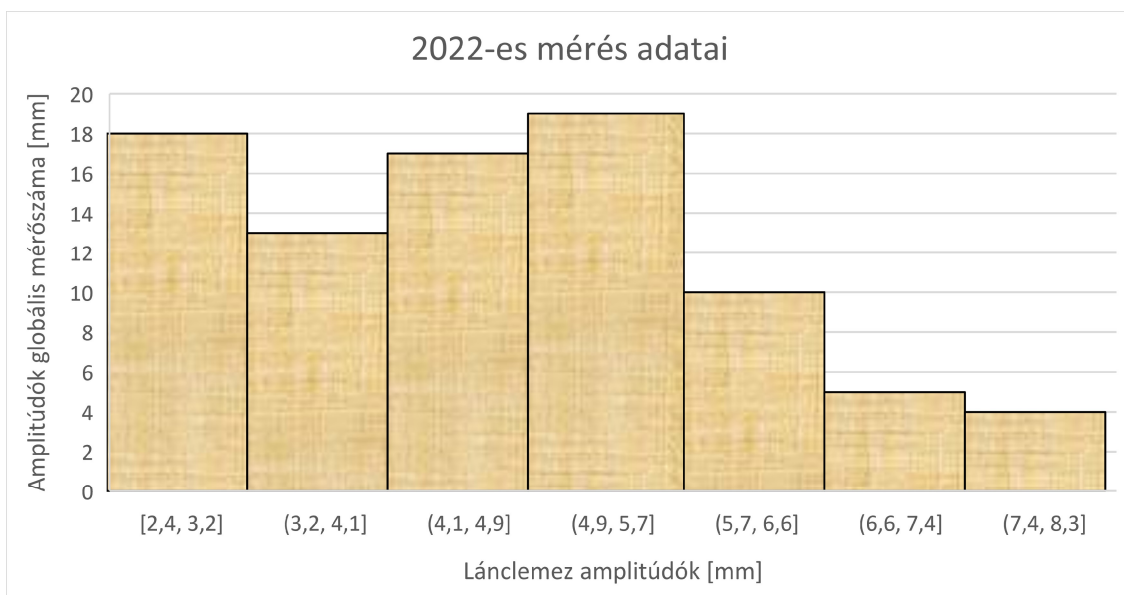
A kiértékelés során minden mért lánclemez (86-88 db) átlagos amplitúdóját vettem az adatok ábrázolásához. A következő diagramok (20. ábra-22. ábra) abszcissa tengelye a lánclemezek korróziós fogyását mutatják mm-ben, az ordináta tengelye ezen amplitúdók globális mérőszámát/darabszámát jelölik.



20. ábra: 1986-ban mért lánclemezvastagságok korróziós krátermélységei



21. ábra: 2002-ben mért lánclemezvastagságok korróziós krátermélységei



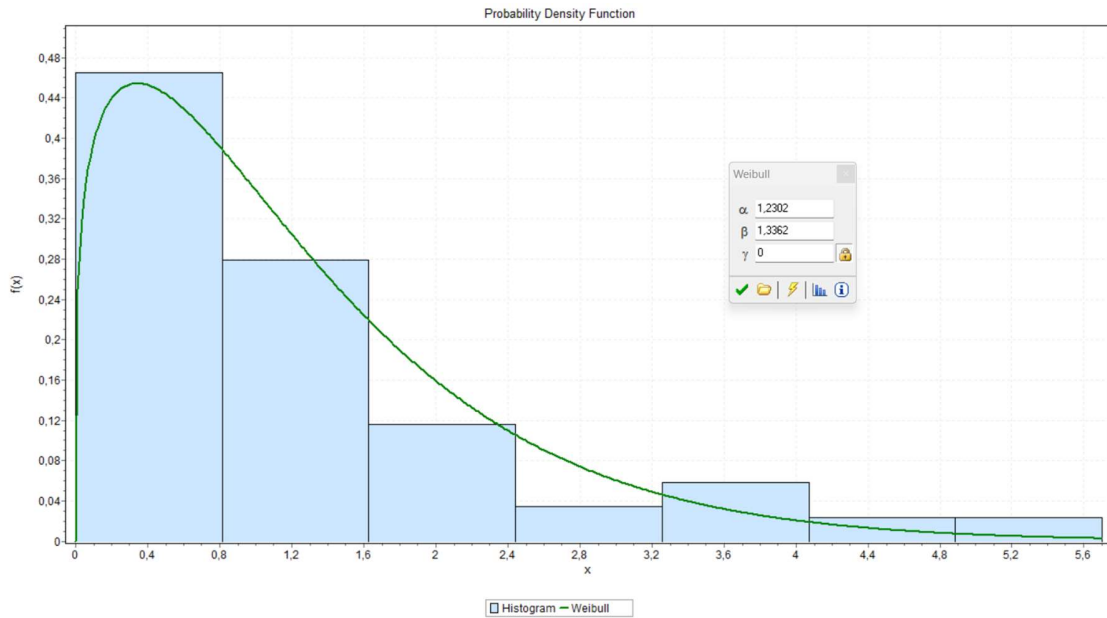
22. ábra: 2022-ben mért láncclemezvastagságok korróziós krátermélységei

Ezekon a diagramokon is jól látható a korróziós fogyás mértékének az időbeli változása és az egyre növekvő mértéke. Amíg 1986-ban a legtöbb korróziós kráter 1,5 mm alatti volt, addig 2002-re a legtöbb helyen a 16 évvel azelőtti értékek szinte duplája volt tapasztalható. 2022-ben mért adatok pedig megmutatták, hogy mennyire volt szükségeszerű az újabb felújítás, hiszen itt már átlagosan 4-5 mm-es lemezfogyások adódtak.

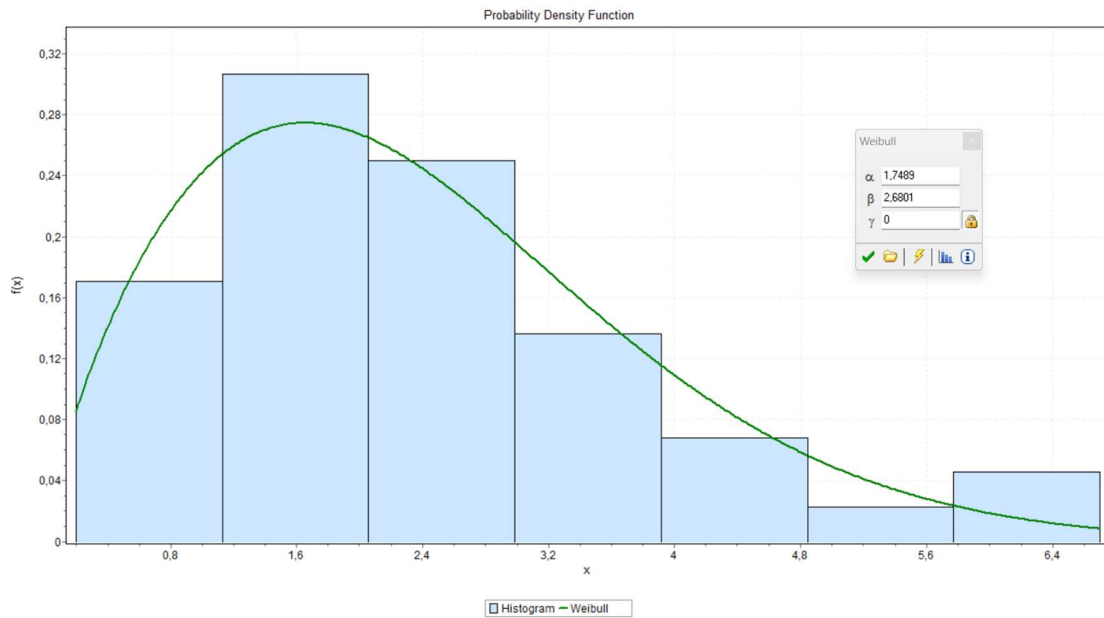
Ezután az volt a célom, hogy az előállított diagrammokra eloszlásfüggvényt illesszek, hogy azokkal jobban látható, illetve követhető legyen az adatok változásának alakulása. Ehhez az Easyfit programot alkalmaztam. Ez a szoftver a megadott adatokra állít elő hisztogramokat, illetve illeszt rájuk több, mint 60 féle sűrűségfüggvényt, majd rangsorolja ezeket a Kolmogorov-Szmirnov teszt alapján. Az 1986-os értékekre illesztett függvény esetében a Weibull eloszlásnak volt a legjobb a Kolmogorov-Szmirnov tesztje. A 2002-es adatok esetén csak a középmezőnyben foglal helyet a Weibull eloszlás, viszont 2022-es értékeket tekintve második legkedvezőbb ez a függvény a teszt alapján. Ezen eredmények, és a szakirodalmi tapasztalatok alapján a Weibull függvényt alkalmaztam a továbbiakban.

Az előbb bemutatott amplitúdókra illesztett Weibull sűrűségfüggvényeket, illetve a Kolmogorov-Szmirnov teszt rangsorokat a 23. ábra mutatom be. Az Easyfit-ből kivett diagramok vízszintes

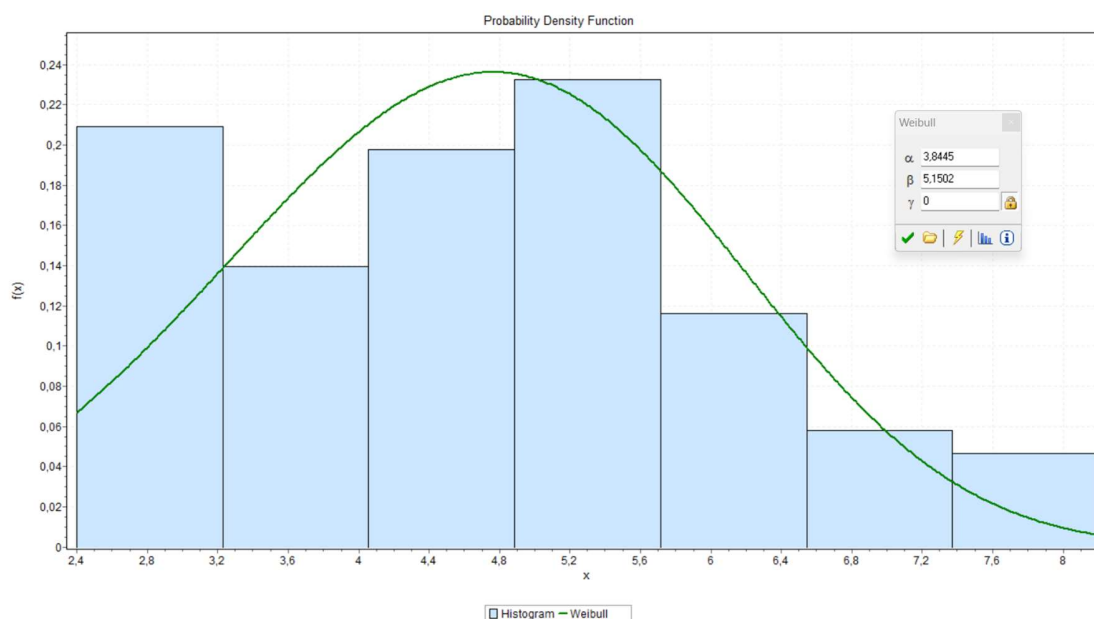
tengelye az amplitúdók értékeit jelölik, míg a függőleges tengely pedig a normált valószínűségi eloszlást adja. A függvények paramétereit a 2. táblázat tartalmazza.



23. ábra: 1986-os adatokra illesztett Weibull sűrűségfüggvény



24. ábra: 2002-es adatokra illesztett Weibull sűrűségfüggvény



25. ábra: 2022-es adatokra illesztett Weibull sűrűségfüggvény

Distribution	Kolmogorov Smirnov	
	Statistic	Rank
Weibull	0,07739	1
Lognormal	0,07982	2
Lognormal	0,07983	3
Gen. Extreme Value	0,08039	4
Gen. Pareto	0,08098	5
Gen. Gamma	0,08135	6
Fatigue Life	0,08176	7
Fatigue Life	0,08176	8
Weibull	0,08374	9
Burr	0,08682	10
Burr	0,08682	11
Gamma	0,08694	12
Gen. Gamma	0,08727	13
Pearson 6	0,08807	14
Pearson 6	0,08807	15
Dagum	0,09332	16
Dagum	0,09332	17
Log-Logistic	0,09373	18
Log-Logistic	0,09559	19
Johnson SB	0,09714	20
Gamma	0,10254	21
Pert	0,10615	22
Inv. Gaussian	0,11379	23
Inv. Gaussian	0,1258	24
Gumbel Max	0,12599	25

Distribution	Kolmogorov Smirnov	
	Statistic	Rank
Log-Logistic (3P)	0,06393	1
Dagum	0,07041	2
Frechet (3P)	0,07126	3
Gumbel Max	0,07207	4
Pearson 5 (3P)	0,07276	5
Rayleigh	0,07337	6
Lognormal (3P)	0,07513	7
Gen. Extreme Value	0,07532	8
Inv. Gaussian (3P)	0,07695	9
Fatigue Life (3P)	0,07728	10
Burr (4P)	0,08052	11
Dagum (4P)	0,08132	12
Pearson 6 (4P)	0,08136	13
Rayleigh (2P)	0,08205	14
Gamma (3P)	0,0822	15
Burr	0,08234	16
Beta	0,08351	17
Log-Pearson 3	0,08445	18
Gamma	0,08766	19
Rice	0,0895	20
Gen. Gamma (4P)	0,09045	21
Weibull (3P)	0,09152	22
Kumaraswamy	0,09172	23
Johnson SB	0,09355	24
Weibull	0,09484	25

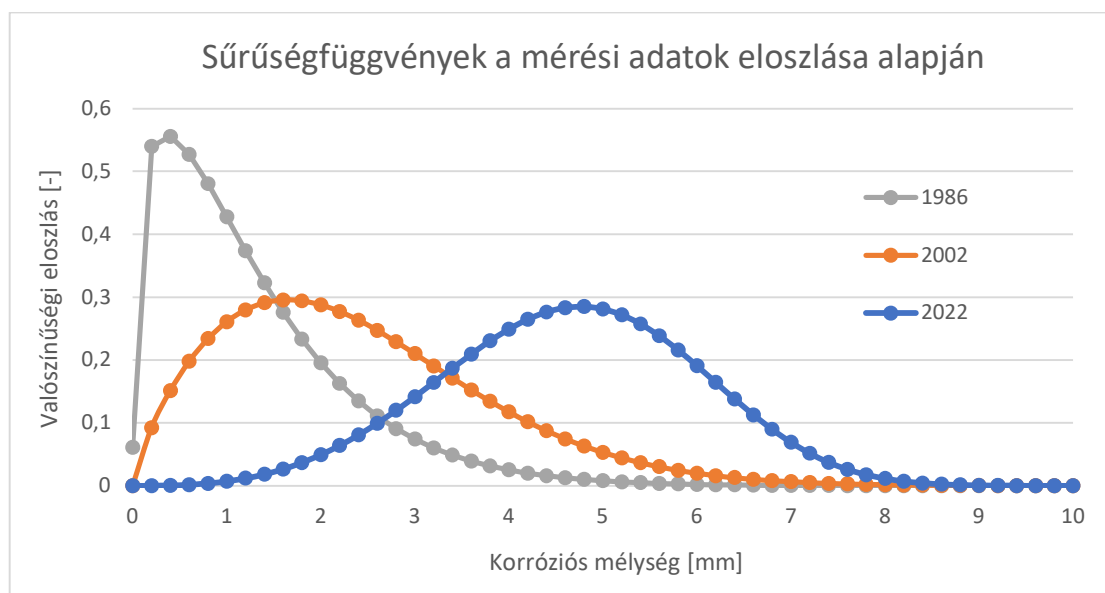
Distribution	Kolmogorov Smirnov	
	Statistic	Rank
Error	0,0636	1
Weibull	0,06835	2
Normal	0,07242	3
Burr	0,07341	4
Nakagami	0,07904	5
Dagum	0,07918	6
Gen. Extreme Value	0,07923	7
Johnson SB	0,0827	8
Gen. Pareto	0,08282	9
Log-Logistic (3P)	0,08461	10
Logistic	0,08541	11
Pearson 5 (3P)	0,08694	12
Pearson 6 (4P)	0,08759	13
Uniform	0,08869	14
Lognormal (3P)	0,08987	15
Hypersecant	0,09124	16
Gamma	0,09314	17
Gen. Gamma	0,09382	18
Fatigue Life (3P)	0,09394	19
Log-Pearson 3	0,09591	20
Pearson 6	0,09653	21
Triangular	0,09679	22
Rayleigh (2P)	0,09701	23
Rice	0,09764	24
Inv. Gaussian (3P)	0,10133	25

26. ábra: Kolmogorov-Szmirnov tesztek táblázatai 1986, 2002 és 2022-es évek adatai alapján

7. Korróziós modell kidolgozása

Ebben a fejezetben ismertetem, hogy a Széchenyi lánchíd lánclemezeinek korróziós folyamata időben hogyan változik, és becslést adok arra, hogyan változhat majd a jövőben.

Először Excel környezetben is felrajzoltam a sűrűségfüggvényeket a táblázatkezelőbe épített Weibull-függvénnyel, illetve a kapott paraméterek segítségével. 2 tized milliméterenként vettem fel egy-egy pontot az x tengely mentén, mely pontokban kiszámoltam a függvényértékeket, majd ezeket ábrázoltam a diagramon. Ezt mutatja a 27. ábra. A diagram vízszintes tengelye a korróziós mélység (amplitúdók) értékeit mutatja milliméterben, míg ezen adatok valószínűségi eloszlása található a függőleges tengelyen.



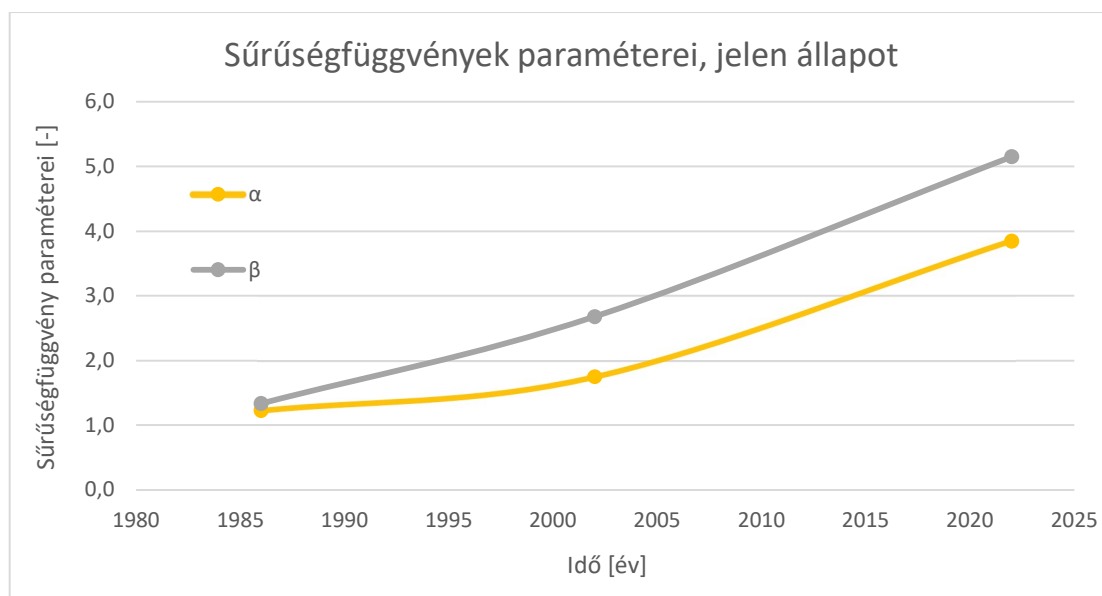
27. ábra: Az eloszlások paramétereit alapján Excelben felrajzolt sűrűségfüggvények a három mérési évre

Egy ábrára tettem az 1986-os, 2002-es és a 2022-es mérési eredmények alapján rajzolt görbéket, melyekből egyrészt jól látszik a korrózió időbeli változása az évek során, illetve a görbék jól tükrözik az Easyfit által előállított függvényeket is.

A jövőbeli extrapolációhoz elsőként ábrázoltam a Weibull függvények α és β paramétereit az idő függvényében, ezt mutatja a 28. ábra. A függvények paramétereit a 2. táblázat tartalmazza.

Weibull paraméterek			
paraméter/év	1986	2002	2022
α	1,2302	1,7489	3,8445
β	1,3362	2,6801	5,1502

2. táblázat: Weibull eloszlásfüggvény paraméterei



28. ábra: Sűrűségfüggvények paraméterei az idő függvényében

A diagramról megfigyelhető az 1986-os paraméterek közelsége, illetve az, hogy 2002 és 2022 között egymással párhuzamosan változik a két paraméter.

Az Excel segítségével ezt követően meghatároztam a két adatsor trendvonalát, és egy-egy exponenciális függvényt illesztettem rájuk. A vizsgált szakirodalomban [17] az alábbi két harmadfokú polinomiális függvényt illesztették az adatokra.

$$\alpha = 0,0020 * Y_e^3 - 0,0994 * Y_e^2 + 1,5604 * Y_e - 6,0025 \quad (2)$$

$$\beta = 0,0004 * Y_e^3 - 0,0248 * Y_e^2 + 0,4793 * Y_e - 2,3812 \quad (3)$$

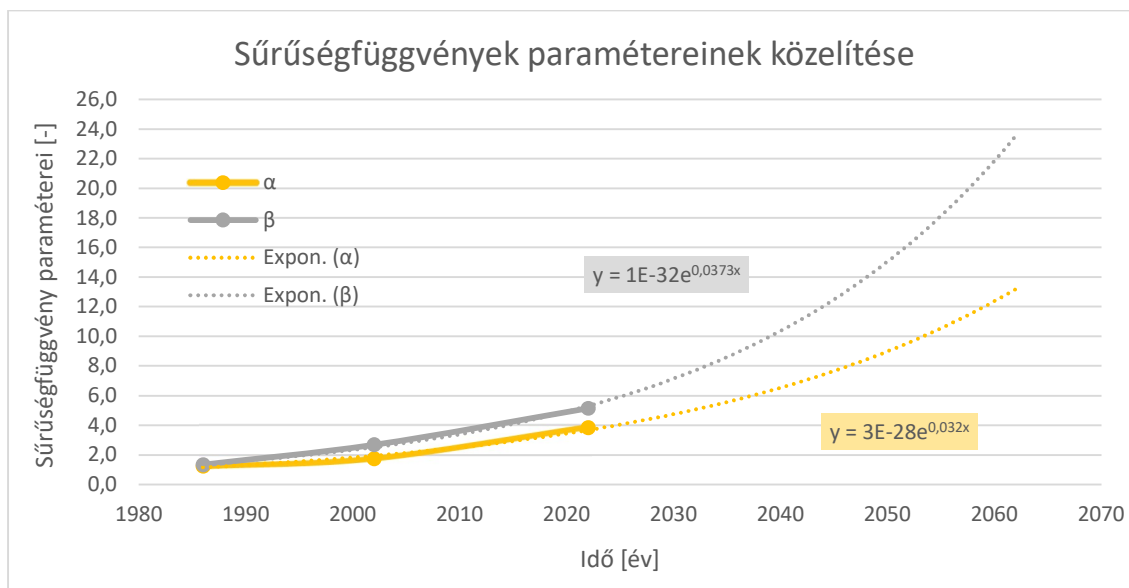
Megvizsgáltam, hogy ezek a képletek a paraméterekre milyen értékeket adnak vissza, ennek eredményeit mutatja a 3. táblázat. A mi esetünkben a β értékek a nagyobbak, itt 1986-tól eltekintve ez nem igaz. Emellett egyedül a 2002-es α értéknél mutatott valamilyen hasonlóságot a két adat. A jelentősen különböző eredmények azzal magyarázhatóak, hogy a szakirodalmi kutatásnál tengeri

környezetnek kitett hajó korrodált acél elemeit vizsgálták, tehát a környezeti, időjárási kitettség más jellegű a két kutatás esetén.

Szakirodalmi Weibull paraméterek			
paraméter/év	1986	2002	2022
α	-6,0025	1,7095	14,6615
β	-2,3812	0,5772	1,3952

3. táblázat: Szakirodalmi Weibull eloszlásfüggvény paraméterei

Emellett nagy különbség volt, hogy a publikált kutatásban minden egyes évre volt paraméter értékük, így sokkal több adattal tudtak dolgozni, melyekre a polinomiális függvény pontosabb eredményt adhatott. A mi esetünkben három mérési év adataira másodfokú polinomiális függvény volt illeszthető, de a kevés adat miatt rosszul kondicionált egyenleteket adott volna vissza, ezért inkább exponenciális függvényt alkalmaztam. A trendvonalakat és a rájuk illesztett exponenciális függvényeket szemlélteti a 29. ábra. Az abszcissza tengely az idő múlását, az ordináta tengely pedig a sűrűségfüggvények paramétereit mutatja.



29. ábra: Exponenciális függvények illesztése a paraméterekre

A kapott exponenciális egyenletek rendre a következők:

$$\alpha = 3 * 10^{-2} * e^{0,0320*x} \quad (4)$$

$$\beta = 1 * 10^{-32} * e^{0,0373*x} \quad (5)$$

8. Széchenyi lánchíd korróziós folyamatának időbeli elemzése

A vizsgálataim során két alapeset alapján elemeztem a Széchenyi lánchíd lánclemezek korróziós folyamatának időbeliségét. Egyik esetben azt vizsgáltam, hogyan alakult volna a korróziós károsodás, ha 2022-ben nem kapott volna a híd új korrózió elleni bevonatot. A másik esetben a jelenlegi helyzetet elemeztem, azaz figyelembe vettem, hogy a híd acélszerkezete korrózió ellen védve lett.

Mielőtt bemutatnám ezeket a vizsgálatokat, szeretném részletesebben ismertetni a lánclemezek korrózió elleni védelmét.

8.1 Széchenyi lánchíd lánclemezek korrózió elleni védelme

A Széchenyi lánchíd MSZ EN ISO 12944-2:2018 szabvány szerint C5 – igen erős (ipari területek, magas páratartalom és agresszív atmoszféra, tengerparti területek) korrozivitási kategóriába tartozik. MSZ EN ISO 12944-1:2018 szerint a bevonat élettartama – a hídszerkezeteknél általában megkövetelt – „H”, hosszú élettartam, amely 15-25 év közötti időtartamot jelent [22].

1986-ban a lánccsatornáknak és a lehorgonyzókamráknak elhelyezkedő lánclemezek, lehorgonyzótömbök korrózióvédelme Vasepox alapozó és 1-2 réteg Vasepox fedőréteg volt. Ezt követően a 2000-es évek elején történő beavatkozás esetén Ameron rendszerrel végezték el a bevonat felújítását [22].

A 2021/22. évi felújítás során a korrózióvédelmi szakvélemény előírta, hogy a bevonati réteg felhordásához szükséges száraz körülmény a horgonykamrában nem, vagy csak nehezen biztosítható, ezért olyan alapozót és bevonati rendszert kell választani, ami felülettoleráns (enyhén nedves felület esetén is alkalmazható). A tervezett bevonatrendszer a következő:

- felülettoleráns, aktív korrózióvédő pigmentet tartalmazó alapozó, mely előzetes vizsgálattal igazoltan a meglévő bevonatrendszerrel összefér,
- epoxi kötőanyagú közbenső és élvédelem,
- poliuretán fedőréteg (szín: RAL 7039, kvarcszürke).

A terv előírta, hogy a kész bevonat összrétegvastagsága 320 - 960 μm NDFT (névleges szárazrétegvastagság) között kell legyen [22].

A felújítás során a Kivitelező mérte a bevonatréteg vastagságát, melynek mérési adatait megkaptam és kiértékeltem. Ezek alapján a 2022-ben felhordott korrózió elleni bevonatrendszer átlagos vastagsága a pesti kamrák alapján 550-600 μm lett, mely megfelel az előírásoknak és minden mérési pontban a tervezett értéknél nagyobb volt.

Megismerve az alkalmazott korrózióvédelmet, a vizsgálataim szempontjából levonható következtetést a bevonat élettartamára vonatkozóan a 8.3 fejezetben fogom ismertetni.

8.2 Nincs korrózió elleni beavatkozás 2022-ben

Ha azt feltételezzük, hogy 2022-ben nem történt volna korrózió elleni beavatkozás, és a korróziós folyamatnak a sebessége a megadott paraméterekre illesztett exponenciális függvény szerint változik a jövőben, akkor az elkövetkező évekre a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** látható paraméterek adódnak. Ezen paramétereket az fentebb említett (4) és (5) egyenletek alapján számoltam ki.

Ha nincs korrózióvédelem 2022-ben			
paraméter/év	2032	2042	2052
α	5,2082	7,1723	9,8772
β	8,2555	11,9877	17,4071

4. táblázat: A következő évek számolt paraméterei

Ezen paraméterek alapján előállítottam hasonló sűrűségfüggvényeket Excel környezetben, mint amilyeneket 1986-os, 2002-es és a 2022-es paraméterek alapján is. A diagram (30. ábra) vízszintes tengelye a korróziós mélységet mutatja milliméterben, a függőleges tengely pedig az értékek valószínűségi eloszlását. A 2022-es (kék) görbe a mérési adatok alapján meghatározott Weibull függvények paraméterei alapján lett ábrázolva, a többi pedig az előbb bemutatott függvények alapján számolt paraméterekkel.



30. ábra: A számolt paraméterek alapján Excelben felrajzolt sűrűségfüggvények az elkövetkező 30 évre, ha 2022-ben nincsen korrózióvédelem

2022-ben végzett mérések alapján 4,7 mm adódott átlagos keresztmetszeti fogyásra a korrózió hatására. Ezekből az adatokból készült Weibull függvénnyel való közelítés 4,8 mm-es átlagot eredményezett keresztmetszeti fogyásra. Ebből is levonhatjuk azt a következtetést, hogy a Weibull függvény használata megfelelő a lemezvastagság értékek eloszlásának modellezésére.

Amikor arra hivatkozok, hogy a sűrűségfüggvényekből x mm az átlagos amplitúdó értéke, akkor megnézem, hogy melyik amplitúdónál éri el a függvény a maximumát, és azt veszem átlagos amplitúdónak az egyes sűrűségfüggvények esetében.

Jól látszik, hogy 2032-re az eloszlásfüggvény mennyit távolodik a 2022-es kék görbétől. 2032-re a függvény alapján 8,0 mm lett volna az átlagos keresztmetszeti fogyás, amely esetben már kimerült volna a lánclemezek teherbírása (111% lett volna a kihasználtság). A következő két vizsgált évben (2042 és 2052) a felgyorsult korrózió már nagyon nagy fogyási értékeket eredményezett, így ezeket nem elemeztem tovább.

8.3 Jelenlegi állapot, korrózió elleni beavatkozással 2022-ben

Már a 2000-es évek elején tervezve volt a Lánchíd teljes felújítása, de 2002-ben csak egy új korrózió elleni bevonatot kapott a híd acélszerkezete, köztük a lehorgonyzó kamrákban található lánclemezek is. A teljes felújításig 2021-ig kellett várni, és 2022-ben készült el a lánclemezek

korrózióvédelme. Itt visszautalva a *4. Mérési eredmények összehasonlítása* című fejezetben feltett kérdésekre: várhatóan mikor kell majd újra beavatkozni a híd életébe a jelenlegi felújítást követő időszakban a lánclemezek korróziója miatt? Erre keresem a választ a következő fejezetekben.

A kiértékelésben lévő bizonytalanság miatt nem tudjuk, hogy a jelenlegi korrózióvédelem meddig fog teljes értékű védelmet biztosítani a láncoknak. Nem tudjuk pontosan azt sem, hogy a láncsatornák lezárása a pályaszintnél, illetve a páraelszívók telepítése a lánckamrákban mennyiben fogja késleltetni a korróziós folyamat továbbhaladását. De ezen beavatkozások várhatóan kedvező mértékben befolyásolják a korróziós folyamat előrehaladását. Ezért a korábbi mérési eredményekből általam meghatározott exponenciális függvény alkalmazása a Weibull eloszlás paramétereinek meghatározásához feltehetőleg a biztonság oldalán lévő közelítés, és a valós szerkezeten a korróziós folyamat előrehaladása ennél kedvezőbb lesz a jövőben. Így a következő fejezetben az általam meghatározott időbeli eloszlásfüggvény alkalmazásával matematikai statisztikai úton szeretnék választ adni az előbb feltett kérdésre.

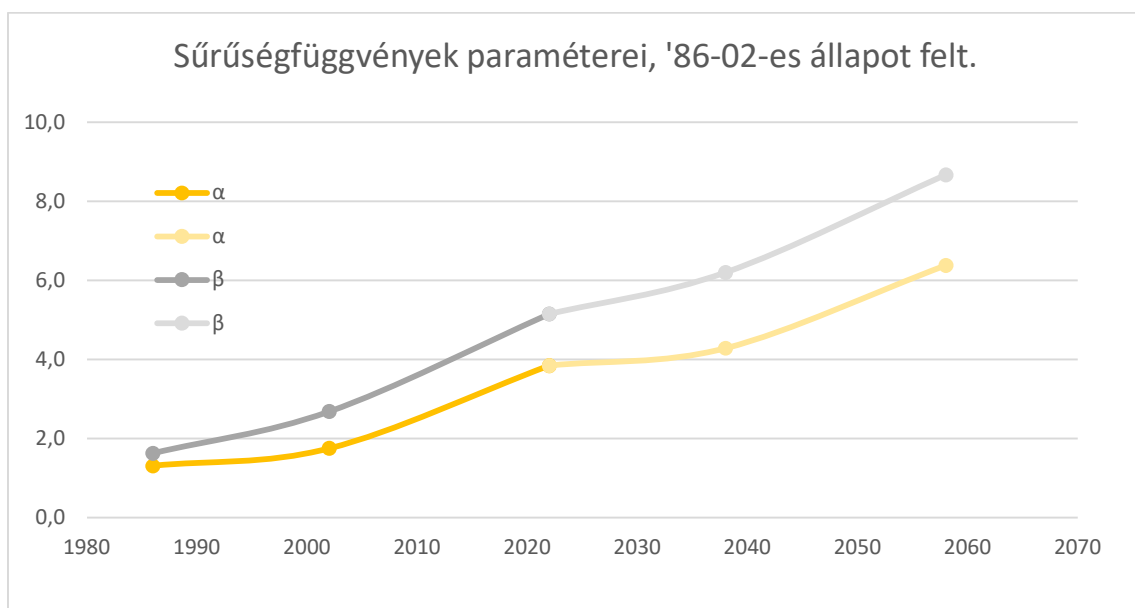
A feltételezésem során az 1986 és 2002 közötti folyamat tendenciáját tekintettem érvényesnek a következő évekre. Ez a feltételezés abból indul ki, hogy a 2022. évben felhordott korrózióvédelem ugyanolyan minőségű és károsodása után azonos sebességgel fog a korrózió terjedni, mint 1986 és 2002 között. Ez a feltételezés egyrészt a biztonság oldalán tett közelítés, mivel a láncsatornában lévő körülmények – a lezárásuk és a párátlanító berendezések beszerelése révén – jobbak lettek, mint korábban voltak. Azonban elképzelhető, hogy a biztonság kárán tett feltételezés, mivel a mérési eredmények azt mutatják, hogy a korróziós folyamat előrehaladtával a korrózióvédelem rongálódása után a korróziós folyamat egyre gyorsuló tendenciát mutat, amit ebben a formában elhanyagolok a számításomban. Ezt a két ellentétes hatást együttesen kezelve azt gondolom, hogy ez a feltételezés egy racionális és fizikailag lehetséges scenáriót vizsgál.

Ez a feltétel a függvények paraméterei kapcsán azt jelenti, hogy a megadott időszak közötti függvényt toltam el a jövőbe 2022-vel kezdődően, amivel így megkaptam a 2022. és 2038. évek, illetve a 2038. és 2058. évek közötti szakaszokat, így erre a két évre számítottam ki a paramétereket a (4) és (5) egyenletek segítségével. Hogy megkapjam a 2038-as évre vonatkozó α és β paramétereket a 2022-es év paramétereire hozzáadtam a 2002-es és az 1986-os évekhez tartozó paraméterek különbségét. Hasonlóan, a 2058-as év paraméterei esetén a 2022-esekhez a 2022. és

2002. évekhez tartozó paraméterek különbségét adtam hozzá. Ezen paramétereket mutatja az 5. táblázat, és szemlélteti a 31. ábra.

Eredeti és extrapolált Weibull paraméterek					
paraméter/év	1986	2002	2022	2038	2058
α	1,3070	1,7489	3,8445	4,2864	6,3820
β	1,6283	2,6801	5,1502	6,2020	8,6721

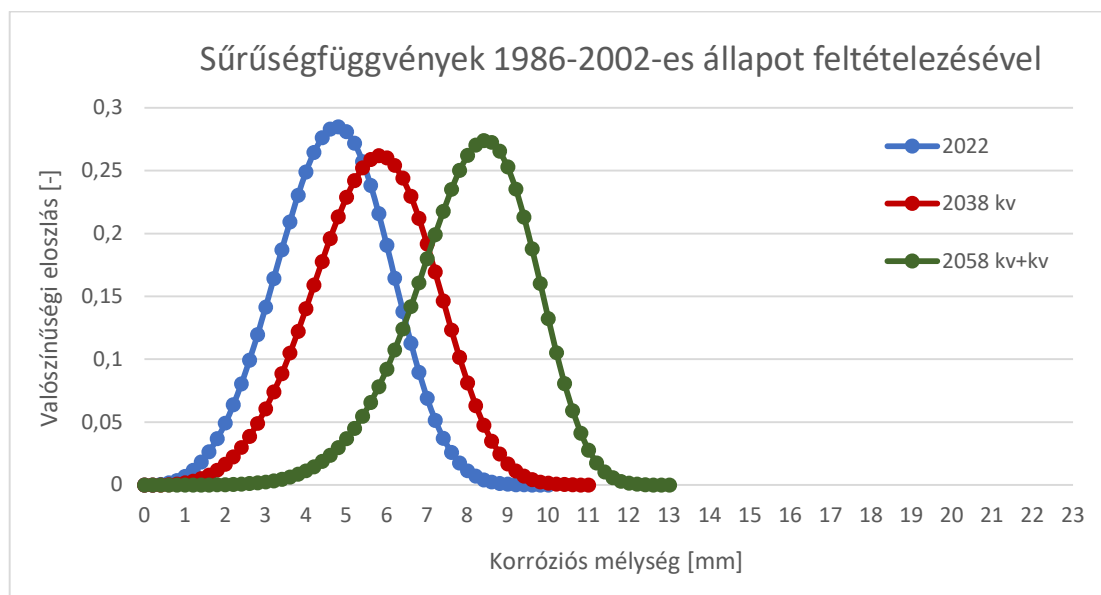
5. táblázat: Az eredeti Weibull eloszlásfüggvény paraméterei és a belőlük extrapolált paraméterek az 1986-2002 közötti állapot feltételezése mellett



31. ábra: Az eredeti és az extrapolált paraméterek grafikus ábrázolása az 1986-2002 közötti állapot feltételezése mellett

Ezen paraméterek alapján itt is meghatároztam a sűrűségfüggvényeket a 2038. és 2058. évekre egyaránt, melyeket a 2022-es évre vonatkozó görbével együtt a 32. ábra mutat.

Itt jegyezném meg, hogy mivel az eredeti paraméterek alapján kapott teljes függvény lett eltolva, ami 2002-ben tartalmaz egy korrózió elleni beavatkozást, ezért ahhoz a feltételhez, hogy 2022 után a korróziós folyamat az 1986 utáni állapot szerint változik, hozzátartozik az is, hogy 2038-ban történik egy újabb korrózióvédelem a szerkezet életében. Ez alapján a diagramon (32. ábra) látható zöld, 2058-hoz tartozó görbe tartalmazza a 2038-as új korrózióvédelmet is. A jelmagyarázatban 2038. év mellett szereplő 'kv' a 2022-es, míg a 2058. év mellett szereplő 'kv+kv' a 2022-es mellett a beiktatott 2038-as korrózióvédelemre utal.



32. ábra: Az extrapolált paraméterek alapján Excelben felrajzolt sűrűségfüggvények az elkövetkező 36 évre, ha 2022-ben van korrózióvédelem és az 1986-2002 közötti állapot van feltételezve

Ezen a diagramon a kékkel jelölt 2022-höz tartozó görbe a mérési adatok alapján meghatározott Weibull függvények paraméterei szerint lett ábrázolva, a többi görbe pedig az előbb bemutatott extrapolált paraméterek alkalmazásával.

Összehasonlítva a 30. ábrával a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** megfigyelhető, hogy a korrózióvédelem sokat számított a következő évek lánclemez amplitúdók sűrűségfüggvényeinél, aminek a hatására, és ebben a fejezetben tett feltételezés mellett, 2038-ra 5,8 mm-es átlagamplitúdót ad a kiértékelés, míg 2058-ra 8,4 mm-t jósol.

Az egész függvény eltolásával egyben feltételeztem tehát egy újabb korrózióvédelmet 2038-ra, 16 évvel a 2022-es után. A 8.1 Széchenyi lánchíd lánclemezek korrózió elleni védelme fejezet alapján hosszú (15-25 év) élettartamra tervezett bevonat esetében, ha figyelembe vesszük a szerkezet életkorát, az 1986 és 2022 között eltelt 36 évet, és az ezzel járó korróziós folyamat felgyorsulását, illetve azt, hogy a lehorgonyzókamrában elég nehéz hozzáférni a lánclemezekhez, és a bevonatrendszer megfelelő és biztonságos felhordásához nélkülözhetetlen száraz körülményeket nem, vagy csak nehezen lehet megteremteni [22], azt mondhatjuk, hogy ez a 16 év múlva történő beavatkozás megfelelő időben történne.

9. Korrodált lánclemezek statikai élettartalma

A sűrűségfüggvények átlagos lemezzvastagság értékeinek segítségével elvégeztem egy számítást a tisztán húzott lánclemezek kihasználtságának meghatározására. Megjegyzendő, hogy a lánccsuklók befeszülése miatt az iránytörések környezetében a húzás mellett nyomtér is keletkezik (ott azonban nincs számottevő korróziós lemezzvastagságcsökkenés), de a lánccsatornában vizsgált lemezek esetén az egyenes szakaszok miatt nyomtér nem alakul ki a láncokban, így a jelen vizsgálatban a lánclemezek húzási ellenállását és húzóerőre való maximális kihasználtságát vizsgálom.

Egy névleges lánclemez $h = 380$ mm magasságú és $v = 29$ mm vastagságú. Ezáltal a névleges keresztmetszeti területe:

$$A_{névl} = h * v = 380 * 29 = 11020 \text{ mm}^2$$

A híd első átépítésekor, 1913-15. között kicserélődött a híd acélszerkezete: 20% nyúlású, 4200-5600 kg/cm² szakítószilárdságú karbonacél váltotta a kovácsoltvas elemeket [23]. Ez a karbonacél a ma használatos S235-ös acélminőségnek megfelelő anyag, melynek a folyáshatára $f_y = 235$ N/mm².

Ezek alapján a lánclemezek normálerővel szembeni teherbírásának tervezési értéke:

$$N_{Rd,névl} = A_{névl} * f_y = 11020 * 235 = 2590 \text{ kN}$$

A tervezői számítások szerint a normálerő igénybevétel tervezési értéke: $N_{Ed} = 2090$ kN.

Ebből a normálerőre vonatkozó maximális kihasználtság korrózió nélküli állapotban:

$$\eta_{névl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{2090}{2590} = 80,7 \%$$

Feltételezve, hogy a terhelés és így a mértékadó igénybevétel nem változik az évek során, ezért a kihasználtság a teherbírás csökkenésével – a korrózió előrehaladásával – folyamatosan növekszik.

9.1 Nincs korrózió elleni beavatkozás 2022-ben

2022-ben 4,8 mm volt az átlagos lemezzvastagság csökkenés, amely azt jelenti, hogy az átlagos lemezzvastagság 24,2 mm volt. Ha ezzel a lemezzvastagsággal végezzük el az előbb bemutatott számítást, akkor a kihasználtságra 96,7%-ot kapunk!

$$\eta_{névl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{2090}{380 * 24,2 * 235} = 96,7 \%$$

Ebből az állapítható meg, hogy a 2022-es felújításra nagyon nagy szükség volt, a lánclemezek teherbírásának szinte a legvégén történt a beavatkozás.

Arra választ kaptunk, hogy mekkora volt a Lánchíd lánclemezeinek a kihasználtsága a felújítás előtt, de mikor merült volna ki ez a teherbírás, ha nem lett volna a 2022-es felújítás?

A normálerő igénybevétel tervezési értékéből visszafelé számolva az adódik, hogy 5,6 mm-es fogyás esetén 100%-os a kihasználtság. Excelben is visszaszámolva (megnéztem, mikor lesz 5,6 mm közelében az átlagos fogyás) a jövő év, 2024 jött ki eredményül, ekkor 5,8 mm lett volna az átlagos lemezvastagság fogyás.

Így a Weibull függvény paramétereire illesztett exponenciális görbe alapján, ha nem történik felújítás és korrózióvédelem 2022-ben, akkor a korrózió hatására 2024-ben merült volna ki a lánclemezek teherbírása.

9.2 Jelenlegi állapot, korrózió elleni beavatkozással 2022-ben

Korrózióvédelem viszont történt a tavalyi év során, így a következő kérdés az, hogy várhatóan mikor kell majd újra beavatkozni a híd életébe a jelenlegi felújítást követő időszakban a lánclemezek korróziója miatt?

A 8.3 fejezetben tett feltételezés mellett ugyancsak azt kell megkeresni, hogy melyik évben lesz az átlagos lemezvastagság fogyás 5,6 mm, hogy ha az 1986 és 2002 közötti korróziós folyamatot vesszük alapul a jövőre nézve.

9.2.1 A feltételezés alapján történő elemzés

A feltételezés alapján 2038-ra érne el a lánclemezek vastagságának a csökkenése az átlagos 6,0 mm-es értéket, amelynél már nem felelne meg a szerkezet normálerőre. Ez éppen 16 évvel lenne 2022 után, mint ahogy az 1986-88-os teljes felújítás után 2002, amikor újra korrózióvédelemmel látták el a lánclemezeket a lehorgonyzókamrában.

Ez viszont nem azt jelenti, hogy ebben az évben kellene felújítani a Lánchidat, hiszen a bevonat élettartamának a becsléséről még nem beszéltem.

9.2.2 A feltételezésből levont következtetések

Az általam megadott feltételezés megalapozott becslésnek mondható, hiszen mért adatokon és azokból meghatározott tendenciákon alapul, de természetesen tartalmaz bizonytalanságokat is. Nem tudhatjuk pontosan milyen lesz a korróziós folyamatnak a lefolyása a jövő évekre nézve, hiszen

- 2022-ben egy nagyon alapos felülettisztításon, és egy új bevonatrendszer felhordáson estek át a lánclemezek;
- a láncsatornákat lezárták, így sokkal kevesebb víz tud bejutni a láncsatornába;
- párátlanító berendezéseket telepítettek a lehorgonyzókamrákba, amiknek az üzemeltetésével még kisebb lesz a pára a láncsatornában és a lehorgonyzókamrákban egyaránt;
- ismert továbbá, hogy a láncok korrózióvédelmét a hídmesternek fokozottan figyelnie kell, esetleges károsodás esetén azonnali beavatkozás van a szerkezeten előírva;

viszont

- a szerkezet életkora egyre csak nőni fog;
- a terhelés és így az igénybevétel várhatóan nem fog változik az évek során;
- a párátlanító berendezések nem biztos, hogy minden évben az előírt kapacitással tudnak majd működni;
- a korrózióvédelemnek a pontos élettartamát nem ismerjük.

A 8.1 fejezetben ismertetett adatok alapján a korrózióvédő bevonatoknak 15-25 évig kellene védelmet biztosítani, viszont ismerve a bizonytalanságokat, azzal a feltételezéssel élnék, hogy 10-15 évig lesz megfelelő állapotban a tavalyi év során felhordott bevonatrendszer. Ezek és a feltételezés **(Hiba! A hivatkozási forrás nem található.8.3 Jelenlegi állapot, korrózió elleni beavatkozással 2022-ben)** alapján az mondható 2040-45 körül kellene felújítani a Lánchidat.

10. Összefoglaló megállapítások és továbblépési javaslatok

Jelen TDK dolgozat célja az volt, hogy a Széchenyi lánchíd korrodált lánclemezeinek az átlagos fogyását előre lehessen jelezni a hídon végzett mérések kiértékelésének alapján.

A kutatásom során elsőként áttekintettem több nemzetközi szakirodalomban fellelhető tanulmányt a korrodált acélszerkezetekkel kapcsolatban, melyek közül az egyik a korróziós veszteség időfüggő előrejelzésével és egy empirikus modell kifejlesztésével foglalkozott. Mivel ez állt a kutatási témámhoz legközelebb, ezért ennek a modellnek a részleteire is támaszkodtam a dolgozat írása közben.

Ezt követően összehasonlítottam az 1986-os, 2002-es és a 2022-es – Acélszerkezetek Tanszék és Hidak és Szerkezetek Tanszék munkatársai által végzett – lánclemezvastagság mérések eredményeit, majd ezeket kiértékeltem. Mivel 1986-ból csak az egyes lánclemezek mért minimum vastagságainak átlagértékei álltak rendelkezésemre, ezért ugyanezeket az adatokat alkalmaztam 2002-ből és 2022-ből is, és ezeket használtam a továbbiakban is.

A mért lemezvastagságok minimum értékeinek az átlaga alapján kiszámoltam minden lánclemezre az átlagos fogyást, mely értékekre az Easyfit programmal eloszlásfüggvényeket illesztettem. A Kolmogorov-Szmirnov teszt és a vizsgált szakirodalom alapján Weibull függvényt alkalmaztam a korróziós folyamat előrejelzéséhez.

Mindhárom évre kiszámítottam a Weibull függvény α és β paramétereit, majd ezek tendenciájára egy-egy exponenciális függvényt illesztettem. Ezen két függvény alapján megvizsgáltam, hogy 2032-ben, 2042-ben és 2052-ben hogyan fognak változni a Weibull eloszlás paramétereit, majd ezek segítségével előállítottam sűrűségfüggvényeket az előbb említett három évre.

Két esetet vizsgáltam:

- A 2022-ben végzett korrózióvédelem nélkül, 2024-re merült volna ki a híd teherbírása az általam végzett extrapoláció alapján.
- Az új korrózióvédelemmel, és azzal a feltételezéssel, hogy a korrózióvédő bevonatok 10-15 évig nem mennek tönkre, 2040-45 körül lenne szükséges egy újbóli felújítás.

A vizsgálatom során egy olyan függvényt használtam az adatok tendenciájának a követésére, melyet nemzetközi szinten is alkalmaztak már ugyanezen területen, ugyanilyen céllal sikeresen,

emellett a függvény által visszaadott átlagos lemezzvastagság fogyás értéke 1 tized milliméterrel tér el a valós adatokból számolt átlagos lemezzvastagság fogyáshoz képest. Ezek alapján az állapítható meg, hogy a Weibull függvény megfelelően tudja modellezni a korróziós folyamatok előrehaladását.

Meglátásom szerint lánclemezzvastagság méréseket nem csak akkor kellene végezni, amikor már szemmel láthatólag szükség van beavatkozásra, hanem sokkal sűrűbben, mivel több mérési adattal sokkal jobban fel lehet térképezni a korrózió sebességének időbeli változását. Jelenleg kevés adatunk van ahhoz, hogy sokkal pontosabb extrapolációt lehessen végezni a Lánchíd korróziós folyamataira. Emiatt azt javaslom, hogy 2027-ben, illetve 2032-ben is legyen egy-egy lemezzvastagság mérés. Az eredmények függvényében az ezt követő időszakban pedig 2-3 évente kellene elvégezni ezeket a méréseket, és akkor ezekkel egy sokkal pontosabb képünk lenne a Lánchíd korróziós állapotáról és időbeli folyamatáról.

Ezzel szemben a 2016-ban kiadott *A budapesti Lánchíd korrózió elleni védelme* című jelentés az javasolja, hogy fokozott ellenőrzést kell végezni a Lánchídon, legalább 2 évente teljes körűen ellenőrizni szükséges a szerkezet korróziós állapotát, és az esetleges javításokat azonnal el kell végezni a következménykárok miatt [22].

Ezeket összefoglalva a további élettartam növeléshez rendszeresen ellenőrizni szükséges korrózióvédő bevonat állapotát, és ha károsodik, akkor újra fel kell újítani!

A következő lánclemezzvastagság mérésig is lehet a kutatást folytatni természetesen. A továbbiakban szeretném ugyanezt a folyamatot lokálisabban is elvégezni, hogy a lánclemezek fáradási tönkremenetelét is lehessen vizsgálni. Emellett szeretném ennek a kutatásnak az eredményeit felhasználni numerikus szimulációkban, hogy numerikus módon is el lehessen végezni a teherbírási, illetve a fáradási vizsgálatokat.

A dolgozatban bemutatott kihasználtsági eredmények és élettartambecslések a lánclemez teherbírásának determinisztikus módon való meghatározásán alapultak. A korrodált lánclemezek teherbírásának sztochasztikus módon való meghatározásával még pontosítható és finomítható lenne a jelen számítási eredmény, ami várakozásaim szerint pozitív irányba befolyásolhatja a következő felújítás becsült időpontját. Ennek a sztochasztikus vizsgálatnak az elvégzése numerikus modell segítségével a jövőbeli terveim között szerepel.

11. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Dr. Dunai László és Dr. Kövesdi Balázs tanár uraknak azt a segítséget, ami ennek a TDK dolgozatnak az elkészüléséhez kellett. Köszönöm, hogy bármikor kérdezhettem, Önök mindig készséggel válaszoltak. Emellett hálás vagyok azért is, hogy ilyen sokat foglalkoznak a korrektúrázással is, hogy a dolgozat egésze egységesebb és szebb legyen!

Irodalomjegyzék

- [1] *A Széchenyi lánc-híd rekonstrukciója*, bkk.hu.
- [2] *Lánc-híd*, budavar.btk.mta.hu.
- [3] *A Lánc-híd története*, cultura.hu.
- [4] BME, Magyar Acélszerkezeti Szövetség: *A Széchenyi lánc-híd szerkezetének átépítése 1913-1915 között*, Budapest, 2018.
- [5] *75 éve robbantották fel a budapesti Duna-hidak*, pestbuda.hu.
- [6] *35 éve teljesen felújították a Lánc-hídat, de a Kádár-címert nem cserélték le*, pestbuda.hu.
- [7] Szittner A.: *Az UVATERV megbízásából a budapesti Lánc-híd lánclemezeinek vastagságméréséről, I. sz. jelentés*, Budapest, 1986.
- [8] Dunai L. és Kövesdi B.: *Vizsgálati jelentés a budapesti Széchenyi lánc-hídon a lánclemezek vastagságának méréséről*, Budapest, 2022.
- [9] Kálló M. és Farkas Gy.: *Vizsgálati jelentés a budapesti Széchenyi lánc-híd lánclemezei vastagságának méréséről*, 2002.
- [10] J. K. Shah, H. B. F. Braga, A. Mukherjee és B. Uy: *Ultrasonic monitoring of corroding bolted joints*, Engineering Failure Analysis, 2019.
- [11] M. R. Khedmati és Z. H. M. E. Nouri: *Analytical simulation of nonlinear elastic–plastic average stress–average strain relationships for un-corroded/both-sides randomly corroded steel plates under uniaxial compression*, Thin-Walled Structures, 2014.
- [12] S. Tohidi és Y. Sharifi: *Load-carrying capacity of locally corroded steel plate girder ends using artificial neural network*, Thin-Walled Structures, 2015.
- [13] Y.-C. Ou, Y. T. T. Susanto és H. Roh: *Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars*, Construction and Building Materials, 2015.

- [14] I.-T. Kim, D. K. Dao, Y.-S. Jeong, J. Huh és J.-H. Ahn: *Effect of corrosion on the tension behavior of painted structural steel members*, Journal of Constructional Steel Research, 2017.
- [15] R. Melchers , M. Ahammed, R. Jeffrey és G. Simundic: *Statistical characterization of surfaces of corroded steel plates*, Marine Structures, 2010.
- [16] Y. Garbatov, J. Parunov, J. Kodvanj, S. Saad-Eldeen és C. Guedes Soares: *Experimental assessment of tensile strength of corroded steel specimens subjected to sandblast and sandpaper cleaning*, Marine Structures, 2016.
- [17] J. K. Paik és D. K. Kim: *Advanced method for the development of an empirical model to predict time-dependent corrosion wastage*, Corrosion Science, 2012.
- [18] Y. Wang, S. Xu, H. Wang és A. Li: *Predicting the residual strength and deformability of corroded steel plate based on the corrosion morphology*, Construction and Building Materials, 2017.
- [19] S.-h. Xu és B. Qiu: *Experimental study on fatigue behavior of corroded steel*, Materials Science & Engineering, 2013.
- [20] G.-c. Qin, S.-h. Xu, D.-q. Yao és Z.-x. Zhang: *Study on the degradation of mechanical properties of corroded steel plates based on surface topography*, Journal of Constructional Steel Research, 2016.
- [21] K. Oszvald, P. Tomka és L. Dunai: *The remaining load-bearing capacity of corroded steel angle compression members*, Journal of Constructional Steel Research, 2016.
- [22] FŐMTERV-MSc-Céh Konzorcium, Seidl Á.: *Korrózióvédelmi szakvélemény: A budapesti Lánchíd korrózió elleni védelmi - Kiviteli terv*, 2016.
- [23] Zsámboki G.: *A vasszerkezetű hidak anyagai, Lánchíd története, Acélszerkezetű közúti hidak építése hazánkban 1945-1969 között*, Budapest: Első Lánchíd Bt., 1969 (lektorálva: 2007), 11-13., 18-24.o..

Ábrajegyzék

1. ábra: Az eredeti Lánchíd [3].....	5
2. ábra: A Lánchíd átépítése 1913-15 között [2]	6
3. ábra: A felrobbantott Lánchíd [5].....	6
4. ábra: Letisztított lánclemezek és mérőműszer a lánccsatornában [8]	7
5. ábra: A mérőműszer tapogatófeje [8].....	8
6. ábra: A mérések helye [8]	9
7. ábra: Mérési vonalak és mérési zóna sematikus ábrája – 2022	10
8. ábra: Lánclemezek jellemző képe a lehorgonyzó szelvényénél [8]	12
9. ábra: Korrózió miatt csökkent keresztmetszetek átlagértékei a névlegesekhez képest.....	13
10. ábra: Budai befolyási oldal alsó láncköteg lánclemezeinek átlagos lemezzvastagságai.....	15
11. ábra: Budai kifolyási oldal felső láncköteg lánclemezeinek átlagos lemezzvastagságai.....	15
12. ábra: Budai befolyási oldal felső láncköteg lánclemezeinek átlagos lemezzvastagságai	16
13. ábra: Pesti kifolyási oldal felső láncköteg lánclemezeinek átlagos lemezzvastagságai.....	17
14. ábra: Szakítászilárdság értékek a degradáció fokának függvényében [16].....	21
15. ábra: A vizsgálatok alapján létrejött felületmodell Ansys környezetben [18]	22
16. ábra: Az alak- és arányossági paraméterek a vizsgált hajó életkorának függvényében [17] ...	23
17. ábra: Az alak- és arányossági paraméterek meghatározása 11-12 éves korban [17]	24
18. ábra: Az eredeti-, illetve a közelítő valószínűségi eloszlás korróziós mélység diagramok az évek függvényében [17].....	24
19. ábra: A korróziós modellalkotás folyamata	26
20. ábra: 1986-ban mért lánclemezzvastagságok korróziós krátermélységei	27

21. ábra: 2002-ben mért lánclemezvastagságok korróziós krátermélységei	27
22. ábra: 2022-ben mért lánclemezvastagságok korróziós krátermélységei	28
23. ábra: 1986-os adatokra illesztett Weibull sűrűségfüggvény	29
24. ábra: 2002-es adatokra illesztett Weibull sűrűségfüggvény	29
25. ábra: 2022-es adatokra illesztett Weibull sűrűségfüggvény	30
26. ábra: Kolmogorov-Szmirnov tesztek táblázatai 1986, 2002 és 2022-es évek adatai alapján...	30
27. ábra: Az eloszlások paraméterei alapján Excelben felrajzolt sűrűségfüggvények a három mérési évre	31
28. ábra: Sűrűségfüggvények paraméterei az idő függvényében	32
29. ábra: Exponenciális függvények illesztése a paraméterekre	33
30. ábra: A számolt paraméterek alapján Excelben felrajzolt sűrűségfüggvények az elkövetkező 30 évre, ha 2022-ben nincsen korrózióvédelem.....	36
31. ábra: Az eredeti és az extrapolált paraméterek grafikus ábrázolása az 1986-2002 közötti állapot feltételezése mellett	38
32. ábra: Az extrapolált paraméterek alapján Excelben felrajzolt sűrűségfüggvények az elkövetkező 36 évre, ha 2022-ben van korrózióvédelem és az 1986-2002 közötti állapot van feltételezve	39

Táblázatjegyzék

1. táblázat: Korrózió miatt csökkent keresztmetszetek átlagértékei a névlegesekhez képest	12
2. táblázat: Weibull eloszlásfüggvény paraméterei	32
3. táblázat: Szakirodalmi Weibull eloszlásfüggvény paraméterei.....	33
4. táblázat: A következő évek számolt paraméterei	35
5. táblázat: Az eredeti Weibull eloszlásfüggvény paraméterei és a belőlük extrapolált paraméterek az 1986-2002 közötti állapot feltételezése mellett	38