



Légköri korrózióálló acél sókorróziós vizsgálata hídszerkezetnél

Megyeri Anna Boglárka¹, Kővári Ákos¹

¹UNITEF'83 Zrt.

E-mail: kovariakos1@gmail.com, megyerib@unitef.hu

DOI: [10.36246/UL.2025.1.05](https://doi.org/10.36246/UL.2025.1.05)

KIVONAT

A környezetünket terhelő károsanyag kibocsátás csökkentés céljából hídépítés tekintetében kiemelt fontosságú az anyagválasztás. Acélszerkezetek esetében előnyös az időjárásálló acélok alkalmazása, mivel a szerkezet korrózióvédelmével (bevonatok), valamint ezek kivitelezésével, gyártásával és karbantartásával járó karbonlábnyom kiküszöbölhető. Magyarországon ezen hidak alkalmazása csak most kezdődik. Az UNITEF'83 Zrt.-nél már számos alkalommal javasoltuk a beruházóknak ilyen acélok alkalmazását. Tanulmány- engedélyezési- és kiviteli terveket is készítettünk már időjárásálló acélok alkalmazásával Magyarországon. A megrendelő, üzemeltetők részéről rendszeres kérdésként vetődik fel az acélanyag sókorróziós viselkedése, ill. az ezzel kapcsolatos gyakorlati tapasztalatok. Jelen cikkben parametrikus végelelemes modell segítségével vizsgáljuk a korrózió hídszerkezetekre történő hatását szakirodalomban található laboratóriumi és helyszíni mérések alapján egy öszvér hídgerenda esetén.

Kulcsszavak: időjárásálló acél, hídépítés, sókorrózió, fenntarthatóság

ABSTRACT

The choice of materials for bridge construction is a priority in order to reduce emissions to the environment. In the case of steel structures, the use of weathering steels is preferable, as the carbon footprint of the structure can be eliminated through corrosion protection (coatings) and their design, manufacture and maintenance. The use of these bridges is only just beginning in Hungary. At UNITEF'83 Zrt. we have already recommended the use of such steels to investors on several occasions. We have also prepared study-, permit- and construction designs using weather-resistant steels in Hungary. Customers and operators regularly raise the question of the salt corrosion behaviour of the steel material and the practical experience with it. In the present paper, the effects of corrosion on bridge structures are investigated using a parametric finite element model based on laboratory and field measurements of a mule bridge girder.

Megyeri Anna Boglárka

Megyeri Anna Boglárka (2001) MSc okl. szerkezet-építőmérnök (BME Építőmérnöki kar, Hidak és Szerkezetek Tanszék, 2025), statikus gyakornok (UNITEF'83 Műszaki Tervező és Fejlesztő Zrt.) Érdeklődési területei: hidak erőtanai modellezése, VEM modellezés, vasbeton- és acélszerkezetek, a hídépítés hatása a klímaváltozás folyamataira. A 2024. évi „Minden építés alapja – Betonpályázat” I. díjasa anyag és technológia kategóriában.

Kővári Ákos

Kővári Ákos (1987) MSc okl. szerkezet-építőmérnök (BME Építőmérnöki kar, 2011) hídépítési irányító tervező 2020-tól (UNITEF'83 Műszaki Tervező és Fejlesztő Zrt.) Érdeklődési területei: hidak és szerkezetek tervezése, környezettudatos híd- és szerkezetépítés, vasbeton- és acélszerkezetek, szabványosítási kérdések. Az év fiatal mérnöke (2017) Construsoft BIM Awards (2019) Közelekdési Innovációs Díj (2023) pályamunka címe: A „Csökkentett CO₂ kibocsátású kerékpárhidak fejlesztése”.

1. BEVEZETÉS

Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére világszerte egyre nagyobb figyelmet fordítanak. Az építőipar jelentős részese a CO₂ kibocsátásnak, így ezen a területen is intézkedések szükségesek. Hidak esetében a fenntarthatóság szempontjából kulcsfontosságú a felhasznált építőanyag megválasztása. Az egyik ígéretes szerkezeti anyag a korrózióálló acél. Magyarországon azonban bizonyos fenntartások merülnek fel ezen hidak alkalmazásával kapcsolatban. Ismeretes, hogy az időjárásálló acél légköri nedvesség hatására megfelelő korrózióvédelmet biztosít. A hídüzemeltetők részéről kérdésként merül fel, hogy kloridion jelenléte a légköri nedvességben milyen hatással van az időjárásálló acélok tulajdonságaira. Elsősorban az útszóró só jelenléte várható hídszerkezetek környezetében. A korrózió a szelvény keresztmetszeti fogyásával és egyenetlen felület kialakulásával jár, ami nagy hatással lehet az anyag mechanikai tulajdonságaira, ezért fontos számításba venni a szerkezetek méretezésekor.

2. SÓKORRÓZIÓS ESETTANULMÁNYOK

Az időjárásálló acél korróziója és a levegő kloridtartalma közötti összefüggést több külföldi tanulmány során is vizsgálták. Készültek helyszíni, hosszú távú mérések és gyorsított korróziós vizsgálatok is.

2.1 CSEHORSZÁGI MÉRÉSEK

Csehország Ostrava városában több éves, helyszíni kísérlet során három, már meglévő híd gerendáira helyeztek ki S355J2W anyagú, 150×100×1.5 mm³ méretű, időjárásálló acél mintadarabokat. [1] [2] B1 híd egy télen sózott, nagy forgalmú autópálya felett ível át és kialakítása alagútszerű, míg B2 híd B1 hídtól 200 méterre vasút felett vezet át. B3 híd a B1 híddal hasonlóan ugyanazon autópálya felett vezet át, kialakítása azonban nem alagútszerű, nagyobb hossz/szélesség aránnyal rendelkezik.

A mérések során külső és belső hídgerendák gerincére és övére helyeztek ki S355J2W időjárásálló acél mintadarabokat. A lerakódó klorid mennyiséget két szabványos (EN ISO 9225) módszerrel, a „wet candle” és a „dry plate” módszerrel mérték. A „dry plate” módszer előnye, hogy külön tudták vizsgálni a függőleges és a vízszintes felületre rakódó klór mennyiséget.

Egy év eltelte után megmérték többek között a korróziós veszteségeket a próbatesteken, továbbá „Scotch-tape” módszerrel lenyomatot készítettek a próbatestek felületéről és megvizsgálták a patinaréteg jellemzőit is: a rozsdás részek átmérőjét, eloszlását. Az 1 mm-nél kisebb, egyenletes eloszlású rozsdás részek megfelelően kialakult patinarétegre utalnak, az 5 mm-nél nagyobbak tipikusan a nem megfelelően kialakult, nem jól védő patinára utalnak.

A mérések eredményei jól mutatják, hogy a korróziós folyamat alakulásában nagy szerepet játszik a vizsgált lemez irányultsága: a vízszintes felületeken lényegesen nagyobb (3-4-szer) klorid mennyiség rakódik le, ezért 2-3-szor nagyobb a korróziós veszteség is, és mélyebbek a kialakult korróziós gödrök, mint a függőleges felületeken.

A felületek irányultsága mellett befolyásolta a kísérlet eredményeit az elhelyezkedés is: a külső gerendák felületén a patina réteg megfelelően alakult ki, homogén és egyenletes volt, míg a belső gerendákon egyenetlenebb, több helyen leválásra hajlamos réteg volt megfigyelhető, annak ellenére, hogy a külső gerendákon mért klorid tartalom nagyobb volt a belső gerendákon mérténél. Ez azzal magyarázható, hogy a külső gerendákat jobban éri a sós víz felferődése az autópályáról, de utána hamarabb tisztulnak meg eső és szél hatására, míg a belső gerendákat hiába éri kisebb mennyiségű klór, nem tudnak megfelelően tisztulni, így rosszabb állapotú patina réteg alakul ki felületükön.

A patina réteg kialakulását befolyásolja a híd elhelyezkedése és kialakítása is, amit a három hídon mért eredmények közti eltérések bizonyítják. Mivel a B2 híd vasút felett halad át az autópálya felett áthaladó B1 híddal ellentétben és kialakítása is kedvezőbb az alagútszerű, B1 híddal képest, a patina

réteg kialakulása is jobban zajlózott le, kevesebb klorid rakódott le a hídra, ezáltal a korróziós veszteségek is kisebbek voltak. A kialakítás szerepét bizonyítja továbbá, hogy a B3 hídon mért lerakódott klorid mennyisége jóval kisebb volt, akár harmada a B1 hídon lerakódott mennyiségnek, annak ellenére, hogy ugyanazon autópálya felett vezetnek át. Ennek az az oka, hogy a B1 híd alagútszerűen kialakított, míg a B3 híd előnyösebb kialakítású.

2.2 KÍNAI MÉRÉSEK

Kínában egy tanulmány [3] során két időjárásálló acéltípuson végeztek vizsgálatokat, a Q345CNH Kínában gyakori (folyáshatára 345 MPa) és a HPS 70 W (folyáshatára 485 MPa) Egyesült Államokban elterjedt acélokon. A kísérlet két részből állt: először ciklikus gyorsított korróziós vizsgálattal figyelték a korrózió alakulását, majd a korrodált elemeket fáradási vizsgálatnak vetették alá. A korrózió két típusát lehet elkülöníteni: a felület mentén egyenletesen alakuló korróziót és a gödrös korróziót. Utóbbinak fáradás szempontjából van nagyobb jelentősége, ugyanis a fáradási repedések a korróziós gödrökből indulnak ki, ahol vékonyabb az anyag. A korróziós vizsgálat körülményei megfeleltek Qionghai (C3 korróziós osztályú) tengerpart közeli város klímájának¹, ahol korábban már készültek hosszú távú korróziós vizsgálatok, így a gyorsított korróziós vizsgálat eredményeit össze lehetett hasonlítani valós körülmények során nyert adatokkal. A gyorsított korróziós vizsgálat és a hosszú távú korróziós vizsgálat között a korróziós veszteség teremt kapcsolatot, aminek köszönhetően a laboratóriumi vizsgálatok megfeleltethetők helyszíni, valós vizsgálatoknak megfelelő korróziós modellel és adatokkal.

A gyorsított korróziós vizsgálat során 30x60x12 mm méretű acéllemezeket alkalmaztak és a kísérletet az ISO 16539 szabványnak megfelelően hajtották végre.

A bizonyos ciklusszámoknál tömegben mért korróziós veszteségeket az (1) egyenlet alapján számították át korróziós vastagsággá:

$$C = \frac{W}{\rho \cdot \text{area}} \cdot 1000 [\mu\text{m}] \quad (1)$$

Ahol:

- $C [\mu\text{m}]$ a korróziós veszteség vastagsága
- $W [g]$ a korróziós veszteség tömegben
- $\text{area} [\text{mm}^2]$ a korrózióknak kitett felület
- $\rho [g / \text{mm}^3]$ az acél sűrűsége

A mérések során megfigyelhető volt, hogy a korróziós folyamat lelassul miután elkezdődik a korróziós réteg kialakulása, vagyis a korróziósveszteség időfüggő. A korróziós folyamat leírására több modell létezik. Mivel a korrózió mértéke kialakulása elején jelentősen különbözik a hosszabb idő elteltével jelentkező korrózió mértékétől, célszerű az alábbi, nem lineáris modell (2. egyenlet) alkalmazása.

$$C = A \cdot t^b \quad (2)$$

Ahol:

- $C [mm]$ a korróziós veszteség
- A a korrózió mértéke az első évben [mm]
- t az eltelt idő
- b a korróziós kitevő [-]

¹ Több tanulmány állapította meg, hogy a sózásból származó korrózió hasonló a tenger közelében épült hidaknál megfigyelt korrózió mértékéhez [1].

Minél kisebb a korróziós kitevő (b), annál jobb a korrózióállósága az anyagnak. A légköri korrózióálló acélnek kb. 33%-kal kisebb a korróziós kitevő értéke, mint a szokványos szerkezeti acélnek. A kísérlet során a 2. egyenlet változóit az idő függvényében ábrázolt korróziós veszteségekre a legkisebb négyzetek módszerével illesztett görbe határozta meg. Az így meghatározott korróziós modellek a két acéltípus esetén (ahol t a korróziós ciklus száma):

$$\bullet \text{ HPS70W: } C [\mu\text{m}] = 42,0 \cdot t^{0.3406} \quad (3)$$

$$\bullet \text{ Q345CNH: } C [\mu\text{m}] = 32,9 \cdot t^{0.4013} \quad (4)$$

A hosszú távú, valós körülmények között lejátszódó természetes korróziós folyamat is leírható a 2. egyenlet segítségével, ezért, ha abból indulunk ki, hogy a korróziós veszteségeknek (C) meg kell egyezniük, a természetes és a gyorsított korróziós folyamat között az alábbi összefüggés áll fent:

$$T = \left(\frac{A_n}{A_a}\right)^{1/b_a} \cdot t^{b_n/b_a} \quad (5)$$

Ahol az „ n ” paraméter a természetes korróziós folyamatra, az „ a ” paraméter a gyorsított korróziós vizsgálatra utal, „ T ” a ciklusszámot, „ t ” a természetes korróziós folyamat idejét, A a korrózió mértékét (első évben) jelenti. Jelen kísérletben a gyorsított korróziós vizsgálat modellje jól közelíti a tenger közelében lévő Qionghai városban korábbi mérések alapján meghatározott korróziós modellt.

Az egyenletes korrózió mellett a rozsdaréteg eltávolítása után megvizsgálták a korróziós gödrök alakulását is. A ciklusszám növekedésével a korróziós gödrök sűrűsége és mérete is nő. A gödrös korrózió mélysége és a korróziós folyamat ideje közötti összefüggés leírására az alábbi összefüggés alkalmazható:

$$a = \alpha \cdot t^\gamma \quad (6)$$

Ahol:

a a korróziós gödör mélység

α és γ a gödrös korrózióhoz tartozó kitevők ($\gamma = 1/3$ acél esetén)

A két acéltípus esetén meghatározott gödrös korrózió modellje:

$$\text{HPS70W: } A [\mu\text{m}] = 89,91 \cdot T^{1/3} \quad (7)$$

$$\text{Q345CNH: } A [\mu\text{m}] = 101,3 \cdot T^{1/3} \quad (8)$$

Ahol:

$A [\mu\text{m}]$ – a maximális korróziós gödör mélység

$T [-]$ – ciklusszám

Jelen esetben egy ciklus megfeleltethető egy eltelt évnek. Látható, hogy idővel a kialakult korróziós gödrök mélysége egyre növekszik, ami kedvezőtlen hatással lehet a fáradásra és a lokális stabilitásra is.

2.3 TOVÁBBI MÉRÉSEK

A jégolvasztó sózás időjárásálló acélra való hatásának vizsgálatára más országokban is végeztek méréseket. Egy 1992-es német kísérletben [4] sózott autópályák vezetőkorlátjára helyeztek időjárásálló acél próbatesteket melyeken öt évig minden évben megmérték a korróziós veszteséget. A próbatestek kétféle anyagból, Resista HRL 37 és COR-TEN B időjárásálló acélból készültek. A tanulmány során az

autópályáktól távolabb is elhelyeztek referencia próbatesteket, melyeket nem ért só. Több tényező hatását vizsgálták a korrózió mértékére: hőmérséklet, relatív páratartalom, éves csapadékmennyiség, éves napsütéses órák száma, valamint az átlagos napi forgalom nagysága. A mérések során azt tapasztalták, hogy a korrózió fogyásának mértékére leginkább a napsütéses órák száma (negatív korreláció) és a relatív páratartalom (pozitív korreláció) volt hatással, míg a hőmérséklet nem igazán befolyásolta a korrózió mértékét. A 7 helyszínen mért korróziós fogyás évenkénti átlagát mutatja a 2. ábra sárga színnel.

Az időjárásálló acél korróziós fogyásának mértékére Finnországban is végeztek méréseket [5] több időjárásálló acélból készült hídnál. Az egyes hidakra COR-TEN B típusú acél próbatesteket helyeztek függőlegesen és a korróziós fogyás mértékét vizsgálták kb. 10 évente 32 éven keresztül 2014-ig. Az egyik vizsgált híd az Itäkeskus gyalogos híd Helsinkiben, ami alatt télen jégolvasztó sózásnak kitett út halad át. Ezen hídra kihelyezett próbatesteken mért korróziós veszteségről 32 év után van adatunk.

A [5] tanulmányban bemutatják egy Dániában végzett mérés eredményeit is, ahol tengeri körülményeknek megfelelő hídon végeztek méréseket a korróziós fogyást illetően. A próbatestek 28 évig voltak kihelyezve és több év mért adatai is rendelkezésünkre állnak. A mérések alapján a híd környezete C3-as korróziós osztályba sorolható az ISO 9223 szabványnak megfelelően, ami megegyezik az útsózásnak kitett hidak belső gerendáinak besorolásával. A mért korróziós fogyásokat és az illesztett korróziós görbéket mutatja az 1. és 2. ábra.

3. KORRÓZIÓ ERŐTANI MODELLEZÉSE

A korrózió előrehaladtával csökken a keresztmetszeti terület és egyenetlen felület alakul ki, amik feszültségkoncentrációhoz és az anyag mechanikai tulajdonságainak romlásához vezetnek. [6] A korrózió mértéke és a mechanikai tulajdonságok romlása közötti összefüggésre több vizsgálatot is végeztek. Az egyik ilyen tanulmány [7] során megfigyelték, hogy 15% alatti korróziós fogyásnál az anyag duktilitása csökkent jelentősen, míg 15% feletti korróziós fogyásnál a duktilitás mellett a folyáshatár és a szakítószilárdság is jelentősen lecsökkent. Esetünkben a korrózió mértéke jóval 15% alatt van, így a duktilitás csökkenésével kell számolnunk, amit a szakadónyúlás csökkentésével veszünk figyelembe a modellezés során.

Ahhoz, hogy kellően pontos végeselemes vizsgálatokat végezzünk, ismernünk kell a korróziós veszteség időbeli alakulását. Az előbbieken bemutatott különböző, sózott körülmények mellett végzett korróziós mérések eredményei alapján felépítünk egy egyenletes és egy gödrös korróziós modellt, amit később a végeselemes modell során fogunk alkalmazni.

A Kínában végzett kísérletek anyagai közül az általunk vizsgált S355W típusú acél anyagtulajdonságaihoz a kísérletben alkalmazott Q345CNH acél tulajdonságai állnak a legközelebb. Az egyenletes korróziós fogyást Qionghai-ban végzett valós korróziós teszt korróziós fogyásának modelljével vesszük figyelembe, ami jól közelítette a Q345CNH acél gyorsított korróziós modelljét. A korróziós fogyás a [3] alapján:

$$C [\mu m] = 32,175 \cdot t^{0.4385} \quad (9)$$

Ahol $C [\mu m]$ a korróziós fogyás, t az eltelt évek száma.

A 2.3 fejezetben bemutatott dániai mérés nem útsózásból eredő korróziós fogyást vizsgált ugyan, hanem tengeri körülményeknek megfelelőt, ami nagyon hasonló az útsózásból eredő korróziós fogyásnak. A dániai mérési eredményekre illesztett korróziós modell:

$$C [\mu m] = 50 \cdot t^{0.33} \quad (10)$$

A mérési eredmények alapján megadtak továbbá egy felső becslést is a korróziós fogyásra:

$$C [\mu m] = 60 \cdot t^{0.5} \quad (11)$$

A kínai és dániai kísérlet alapján felállított egyenletes korrózió modelljeit 0-100 év között az egyes kísérletek alapján a 1. ábra mutatja. Látható, hogy a kínai és a dániai illesztett modell közel állnak egymáshoz.

A 2.3 fejezetben bemutatott német mérés eredményei alapján a korróziós fogyást a 2. ábra sárga vonala szemlélteti. Ezen mérés során a próbatesteket nem hídgerendára, hanem a sózott út vezetőkorlátjára helyezték, amire jóval több só csapódik fel, mint egy hídgerendára, így a hidakon alkalmazott szelvények korróziós fogyását jelentősen túlbecsüli. A 2. ábrán megfigyelhető, hogy a német mérési adatok jól illeszkednek a dániai felülbecsült korróziós modellre. A német mérések és a dániai felülbecsült korróziós modell alapján a korróziós fogyás kb. 2,3-szorosa a kínai és dániai illesztett korróziós modell alapján meghatározott korróziós fogyásnak.

A cseh mérések csak egy éves korróziós fogyásra adnak eredményt. A mérések során külön vizsgálták a külső és belső gerendákon, valamint a vízszintesen és függőlegesen elhelyezett próbatesteken keletkező korróziós fogyást. A vízszintes és függőleges pozíciójú próbatesteken mért fogyások átlaga:

- külső gerendán: 33,625 [μm]
- belső gerendán: 34,05 [μm]

Az átlagok nagyon jól közelítik a kínai mérések egyenletes korróziós modelljéből származó egy éves fogyás mértékét, ami 32,175 [μm].

A finnországi mérésekről csak 32 év után mért adat áll rendelkezésünkre. A mérések során a próbatesteket csak függőlegesen helyezték el és elkülönítették a külső és belső gerendákon mért eredményeket. A 32 év után külső és belső gerendákon mért korróziós fogyás értéke a 2. ábrán látható. A finnországi belső gerendákon mért fogyás 88%-a, a külső gerendákon mért fogyás csak 67%-a a kínai egyenletes korróziós modell értékeinek. Ennek oka többek között az lehet, hogy a finnországi méréseknél függőlegesen helyezték el a próbatesteket és függőleges felületen kisebb fogyás alakul ki, mint vízszintesen.

A gödrös korrózió mértékére csak a cseh és kínai kísérletek során végeztek méréseket, több éves modellt pedig csak a kínai mérések alapján lehet felállítani. A gödrös korrózió modellje a 2.2. bekezdésben bemutatott kínai mérések alapján:

$$A [\mu\text{m}] = 101,3 \cdot T^{1/3} \quad (12)$$

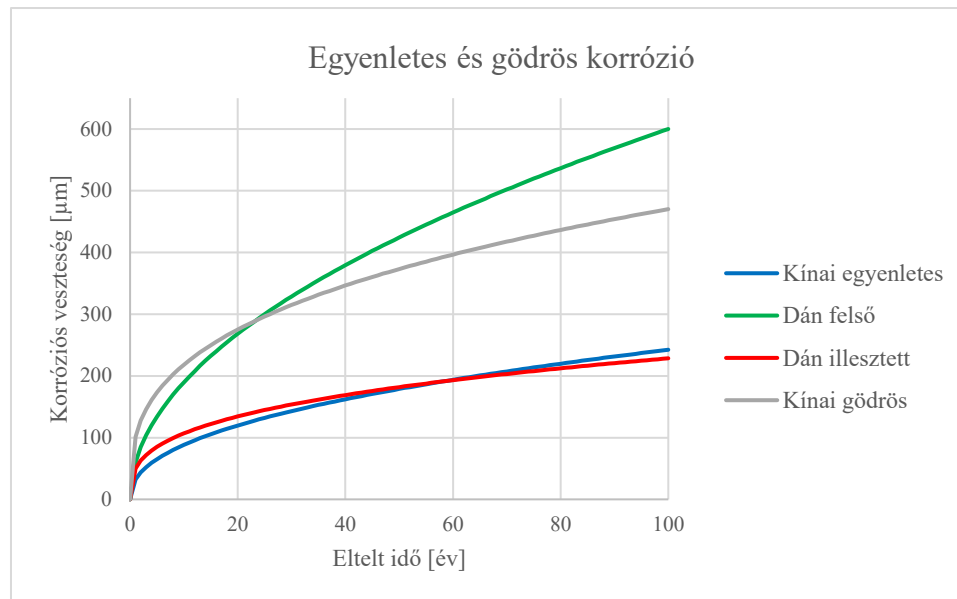
Ahol $A [\mu\text{m}]$ a maximális korróziós gödör mélység, $T [-]$ a ciklusszám, ami jelen esetben megfelel az eltelt évek számának.

Ez a modell a maximális gödörmélység alakulását adja meg az eltelt évek függvényében (lásd: 1. ábra).

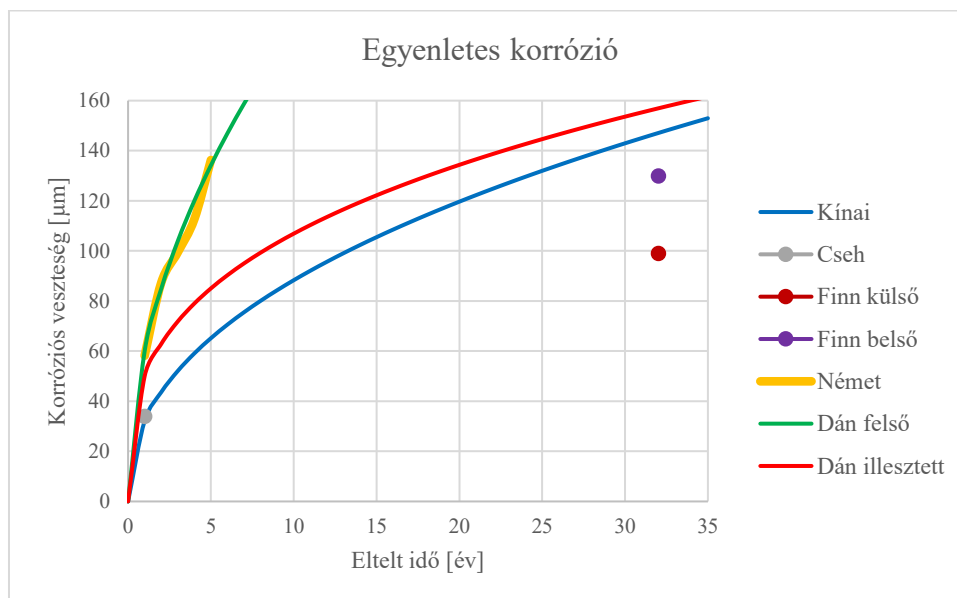
A cseh mérések során a vízszintes pozíciójú próbatesteken mért átlagos gödörmélységek:

- külső gerendán: 61 [μm];
- belső gerendán: 51,5 [μm]

Ezek az átlagos értékek a kínai gödrös korróziós modell 1 év elteltével kialakult maximális gödörmélységének (101,3 [μm]) közelítőleg a fele.



1. ábra: Egyenletes és gödrös korróziós 0-100 év között.



2. ábra: Egyenletes korrózió 0-35 év között.

A végeselemes modell során összehasonlításképp megvizsgáljuk a modellezett szelvény korróziós fogyását úgy is, hogy hagyományos, nem időjárásálló acél anyagot alkalmazunk. A szerkezeti acél korróziós fogyásának meghatározására egy olyan modellt alkalmazunk, melyet tengeri teherhajókon végzett korróziós mérésekből származtattak, így megfelel a sós körülmények kritériumának, de az útsózásból eredő korrózió mértékét valószínűleg felülbecsüli. Bizonyos idő elteltével a nem időjárásálló szerkezeti acél korróziós szelvényfogyása is lelassul, mivel a rozsdaréteg itt se válik el teljesen a felülettől, ezáltal védve azt. Ezt a teherhajókon végzett tanulmány [8] során is figyelembe veszik és egy olyan korróziós modellt (Guedes Soares és Garbatov) alkalmaznak, mely három részre osztja a korróziós folyamatot: az első fázisban nincs korrózió a felületi védelemnek (festés) köszönhetően, a második fázisban elkezdődik a korrózió a védőréteg megsérülésével és nő a korróziós veszteség, a harmadik fázisban pedig a korróziós folyamat lelassul és végül megáll.

Esetünkhöz a teherhajó fedélzetének korróziója áll a legközelebb, melyet Guedes Soares és Garbatov egy másik tanulmánya [9] során ismertet részletesebben:

A korróziós fogyás átlagértéke:

$$d(t) = 1,85 \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t-10,54}{11,14} \right) \right) \right] \quad (13)$$

A korróziós fogyás szórása:

$$d(t) = 0,384 \cdot \ln(t) - 0,71 \quad (14)$$

Ezen modell során azt feltételezzük, hogy az acélt ~10 évig védi a bevonat, így addig nem korrodálódik. Guedes Soares és Garbatov a tanulmányaik során a korrózió során kialakult maximális gödörmélységet 50 év használat után állapították meg, így ezen modell csak 0-50 év között ad megfelelő eredményt a számítások során.

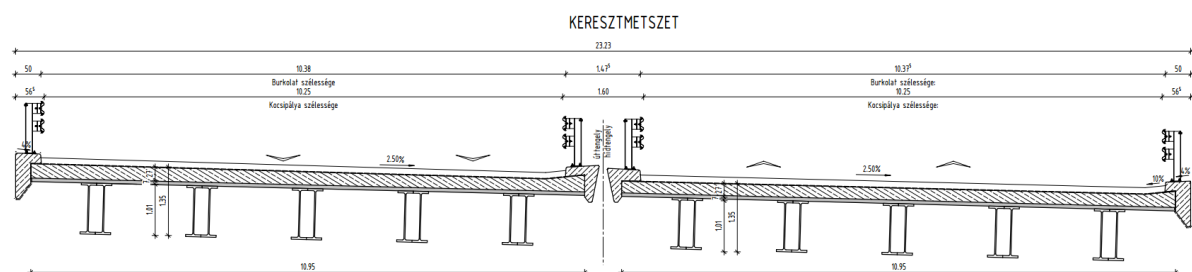
4. VÉGESELEM MODELL

4.1 MODELL BEMUTATÁSA

A végeselemes számítások során egy sózott út felett átvezető híd egy időjárásálló öszvérszerkezetű gerendáját modellezzük ANSYS általános végeselemes programban. A VEM vizsgálat során ezen gerenda korróziós fogyását modellezzük az idő függvényében, majd a korrózió hídgerenda tönkremenetelére (stabilitás) történő hatását vizsgáljuk.

A hídgerenda dupla HEM 1000 szelvényű, S355W időjárásálló acél anyagú.

A VEM modell során a gerenda stabilitásvesztését vizsgáljuk. Mivel a gerenda zárt keresztmetszetű, a globális stabilitásvesztés (kifordulás) nem mértékadó, a szerkezet lokális stabilitásvesztésre érzékeny. A lokális stabilitásvesztés a szelvény nyomott részén található korróziós gödrökből indulhat ki. Mivel a gerenda felső öve a vasbeton pályalemez által megtámasztott, stabilitásvesztés szempontjából az alsó nyomott zóna (nem megtámasztott alsó öv miatt) lesz a kritikus, ami többtámaszú tartó esetén a közbenső támasz felett alakul ki.



3. ábra: Vizsgált hídkeresztmetszet.

Az ANSYS programban az acélgerendát az alul nyomott hosszon SOLID185 térfogatelemekkel, míg a további hosszon BEAM188 rúdelemmel modellezzük. Az együttdolgozó vasbeton pályalemez különösen definiált, SHELL181 héjelemmel kerül modellezésre. A modellt az EN-1991-2 [26] szerint terheljük, állandó és hasznos forgalmi terhekkel.

A gerendát függőleges és keresztirányban mindkét végén megtámasztjuk, hosszirányban csak az egyik végénél, továbbá mindkét végén meggátoljuk a hossz tengely körüli elfordulást. Ezen felül a közbenső támasz feletti végkeresztmetszetenél és a vasbeton pályalemez belső szélén szimmetriát feltételezünk.

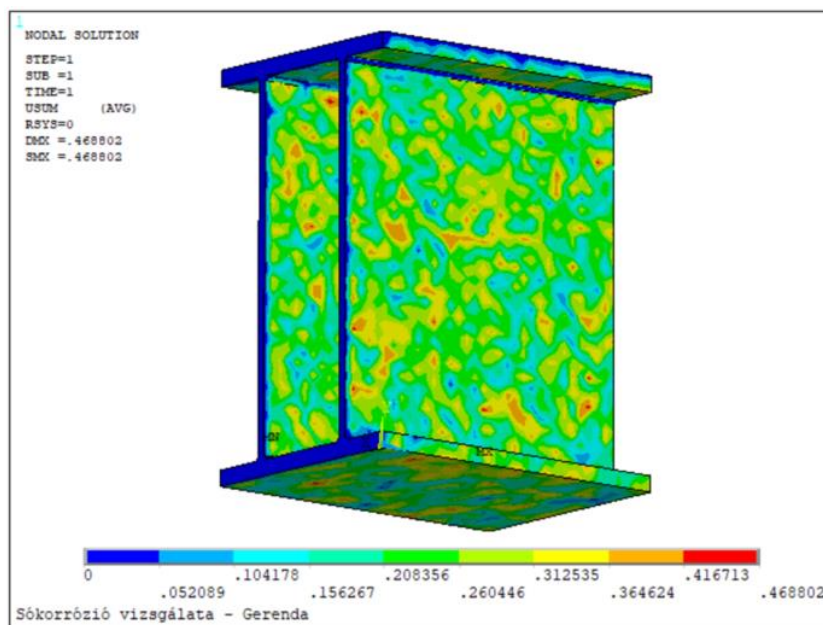
4.1.1 KORRÓZIÓS MODELL

A korróziót a modellben a szelvény „fogyásával” vesszük figyelembe a 3. fejezetben ismertetett modellekkel. A modellezés során a korrózió két típusát különítjük el: modellezzük egyenletes korróziót,

mikor a szelvény lemezeinek vastagságát csökkentjük egyenletesen (a rúdelemekkel és a testelemekkel modellezett részen is), és gödrös korróziót, mikor a szelvényen korróziós gödröket feltételezünk (csak a testelemekkel modellezett részen alkalmazható). A korrózió mértékét mindkét esetben az eltelt évek számának függvényében adjuk meg.

A gödrös korróziót az egyenleteshez hasonlóan a kínai modell alapján vesszük fel. A VEM modellben a gödrös korróziót úgy modellezzük, hogy a szelvény felületén lévő egyes végelemek pontokat különböző mértékben „benyomjuk”, ezzel egy egyenetlen felületet előállítva. A harántkontrakció megakadályozása érdekében a végelemek pontok benyomásakor ideiglenes megtámasztásokat alkalmazunk, melyek a pontokat csak a benyomás irányába engedik elmozdulni. A benyomásból keletkező feszültségek kiküszöböléséhez a benyomás során az anyag rugalmassági modulusát a tízezredére csökkentettük. A kis rugalmassági modulus miatt a keletkező feszültség elhanyagolható mértékű lesz.

A benyomás mértékét időjárásálló acél esetén nulla és a maximális korróziós gödör mélység közötti random számmal vesszük fel. Ezzel a modellezéssel a gödörmélység átlaga várhatóan a maximális érték fele lesz, amire jól illeszkedik a cseh modell alapján meghatározott 1 éves korrózióhoz tartozó átlagos gödörmélység. A gödrös korróziót a testelemmel modellezett szelvényrész egészen működtetjük a felső öv felső részét kivéve, mivel ott a pályalemez miatt nem korrodál a szelvény. A hagyományos (nem időjárásálló) acél esetében a korróziós fogyást a 3. fejezetben bemutatott korróziós modellel (Guedes Soares és Garbatov) vesszük figyelembe. Ez a modell átlagos gödörmélységgel és szórással jellemzi a fogyást, ezért az ANSYS modellen a rúdelemekkel modellezett szakaszon mindenütt az átlagos fogyást feltételezzük, míg a testelemekkel modellezett szakaszon gödrös korróziót modellezzünk és az átlagértéket, valamint a szórást ismerve Gauss-eloszlással adjuk meg a korróziós fogyást. A biztonság javára a gerenda belső részén is definiáltunk korróziós gödröket. Az így előállított és a további számításokhoz kiindulási alapul vett korrodált geometriát mutatja a 4. ábra 100 éves felső becslésű modellt alkalmazva.



4. ábra: Gödrös korrózió geometriája.

4.1.2 ANYAGMODELL, ANALÍZIS

A modellünk során valódi feszültség-nyúlás modellt alkalmazunk és a korrózió hatását a szakítónyúlás csökkentésével vesszük figyelembe az alábbi képlet segítségével [6]:

$$\varepsilon_u = 0,20 - 0,00459 \cdot cr[\%] \quad (15)$$

Ahol ε_u [–] a szakadó nyúlás, és cr [%] a korrózió mértéke, melyet a korrodált térfogat és a kiinduló térfogat arányával határozzunk meg.

A vizsgálat során geometriailag és anyagilag nemlineáris imperfekt (GMNI) analízist végzünk. Nagy elmozdulásokat veszünk figyelembe, valamint a geometriai imperfekciót az EN 1993-1-5 [10] alapján határozzuk meg. A stabilitásvizsgálat alapján az első alak a gerinc lokális horpadása, így a kezdeti imperfekció amplitúdó értéke gerincmagasság/200.

A stabilitásvizsgálat után nemlineáris analízist végzünk, mely során a kiinduló teher lineáris stabilitásvizsgálatból származtatott kritikus teherszorzóval felszorozott értékét működtetjük több lépésben a szerkezeten.

5. EREDMÉNYEK

A végeselemes vizsgálatot elvégezzük a kezdeti, korróziómentes szelvényen, a 3. bekezdésben ismertetett normál lezajlású (kínai) korróziós modell alapján és a korróziót felülbecslő (dániai) modell alapján $t=50$ és $t=100$ évre. A vizsgálatot továbbá elvégezzük hagyományos, nem időjárásálló szerkezeti acél korróziós modelljével is $t=50$ évre.

5.1 NEMLINEÁRIS ANALÍZIS

A tehervezérelt, nemlineáris analízis során előállított teher-elmozdulás diagramokat mutatja a 5. és 6. ábra az utolsó, még konvergált lépésig. A teherszorzó értéke minden esetben megfelel az Eurocode szerinti mértékadó terhelés adott számú többszörösével, míg az elmozdulás értéke a horpadás irányába történő elmozdulást jelenti, ami jelen esetben a gerinc keresztirányú kitérése.

A különböző vizsgálatokhoz tartozó adatokat (korrózió mértéke [%], szakadó nyúlás értéke [–], az utolsó konvergált lépéshez tartozó teherszorzó értéke [–], valamint a lokális horpadás irányába történő elmozdulás értéke [mm]) mutatja az 1. táblázat. Alkalmazott jelölések: t_{III} az időjárásálló acél illesztett korróziós modelljével végzett vizsgálat eredménye, t_{fel} az időjárásálló acél felső becslésű korróziós modelljével végzett vizsgálat eredménye, t_{norm} a hagyományos, nem időjárásálló acél vizsgálatához tartozó eredmény.

Az 1. táblázat azt mutatja, hogy a korrózió mértéke az időjárásálló acél esetén illesztett korróziós modellt alkalmazva 100 év elteltével is 1% alatti térfogatvesztéssel jár. Ez az érték a felső becslésű modellt alkalmazva 100 év alatt 2,2 %-ra emelkedik. A korrózió a hagyományos, (nem időjárásálló acél) esetén a legjelentősebb, ~7% térfogatvesztéssel jár 50 év után. Megfigyelhető, hogy a korrózió az első 50 évben gyorsabb, mint 50 és 100 év között, mikor a kialakult patinaréteg már védi az anyagot.

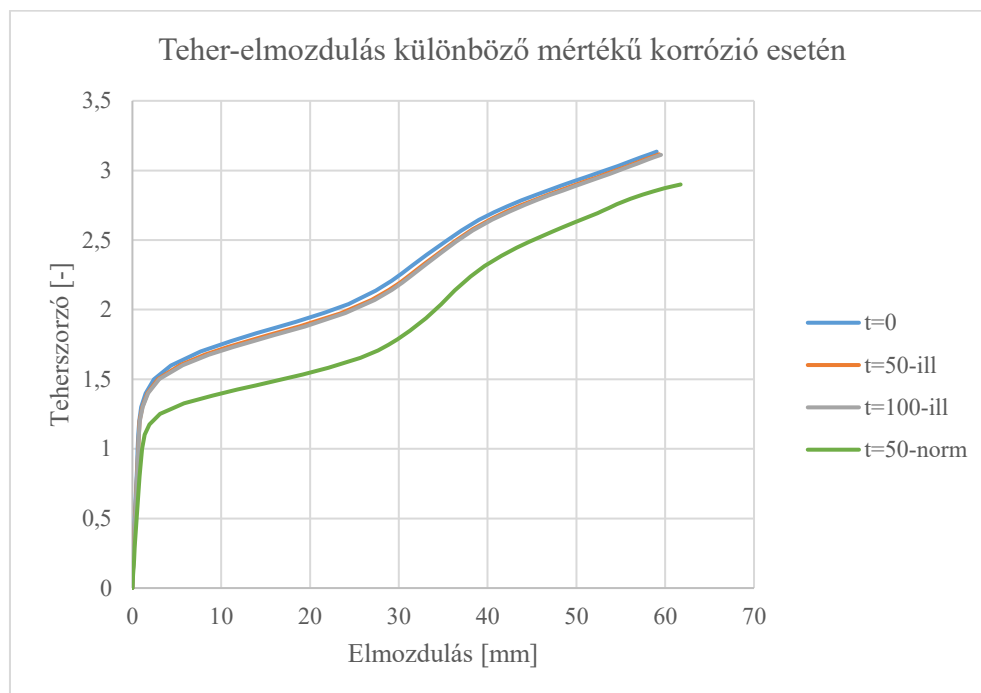
1. táblázat: Eredmények.

idő [év]	korrózió mértéke [%]	szakadó nyúlás ε_u [–]	teherszorzó [–]	teherszorzó $t=0$ év-hez viszonyítva [%]
$t=0$	0,000	0,200	3,135	100,00
$t_{III}=50$	0,577	0,197	3,116	99,39
$t_{III}=100$	0,763	0,197	3,112	99,27
$t_{fel}=50$	1,562	0,193	3,084	98,37
$t_{fel}=100$	2,222	0,190	3,057	97,51
$t_{norm}=50$	6,949	0,168	2,899	92,47

5.1.1 ILLESZTETT KORRÓZIÓS MODELL

A $t=0$ év (kiinduló, korróziómentes), illesztett korróziós modellel előállított $t=50$ év és $t=100$ év, valamint a hagyományos, nem időjárásálló acél $t=50$ év elteltével előállított teher-elmozdulás

diagramokat mutatja a 5. ábra. A diagramon látható, hogy az időjárásálló acél normál korróziós modellel történt vizsgálata során a teher-elmozdulás diagramok szinte egybeesnek, főleg az 50 és 100 év közötti változás eredményei. A nem időjárásálló acél esetén a teherbíráscsökkenés már 50 év után is látványos (~7,5%).



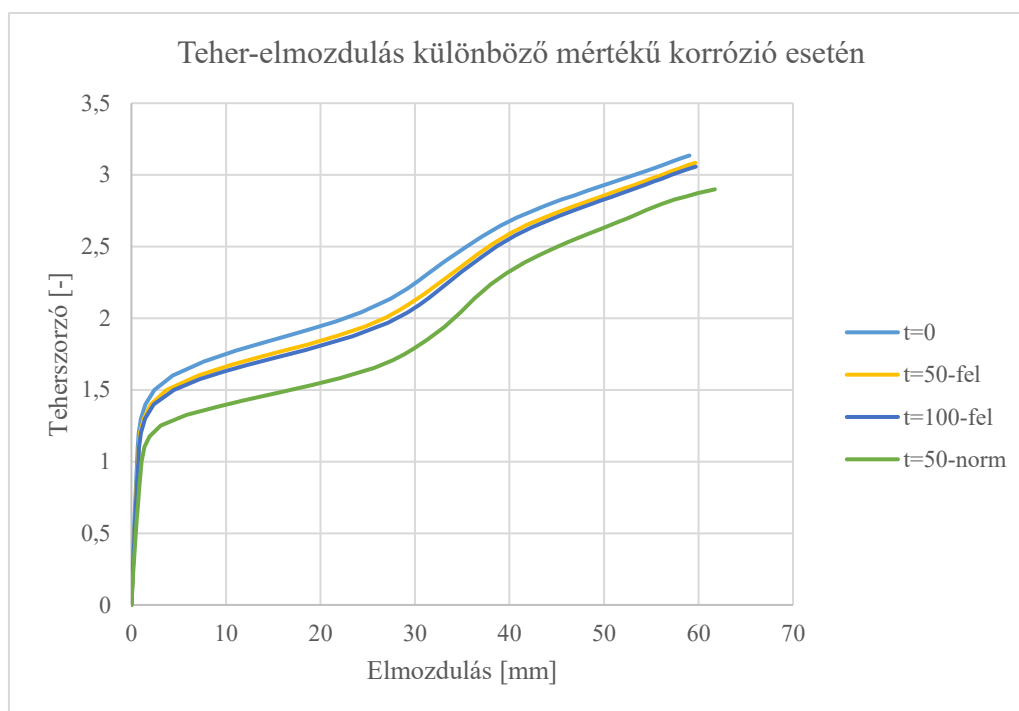
5. ábra: Teher-elmozdulás diagram illesztett sókorróziós modellt alkalmazva [1].

A $t=0$ (korróziómentes) időpontban a szelvény a folyáshatárt a teher ~1,3-szorosánál éri el, a stabilitási tönkremenetel pedig a teher ~3,13-szorosánál következik be.

A $t=50$ év időpontban vizsgált, nem időjárásálló acél szelvény a folyáshatárt a teher ~1,1-szeresénél éri el, ami ~15%-kal csökkent a kezdeti, $t=0$ évben vizsgált szelvénynél származtatott értékhez képest. A stabilitási tönkremenetel pedig a teher ~2,90-szeresénél következik be, ami ~8%-os csökkenést jelent a $t=0$ évben vizsgált eredményhez képest.

5.1.2 FELSŐ BECSLÉSŰ KORRÓZIÓS MODELL

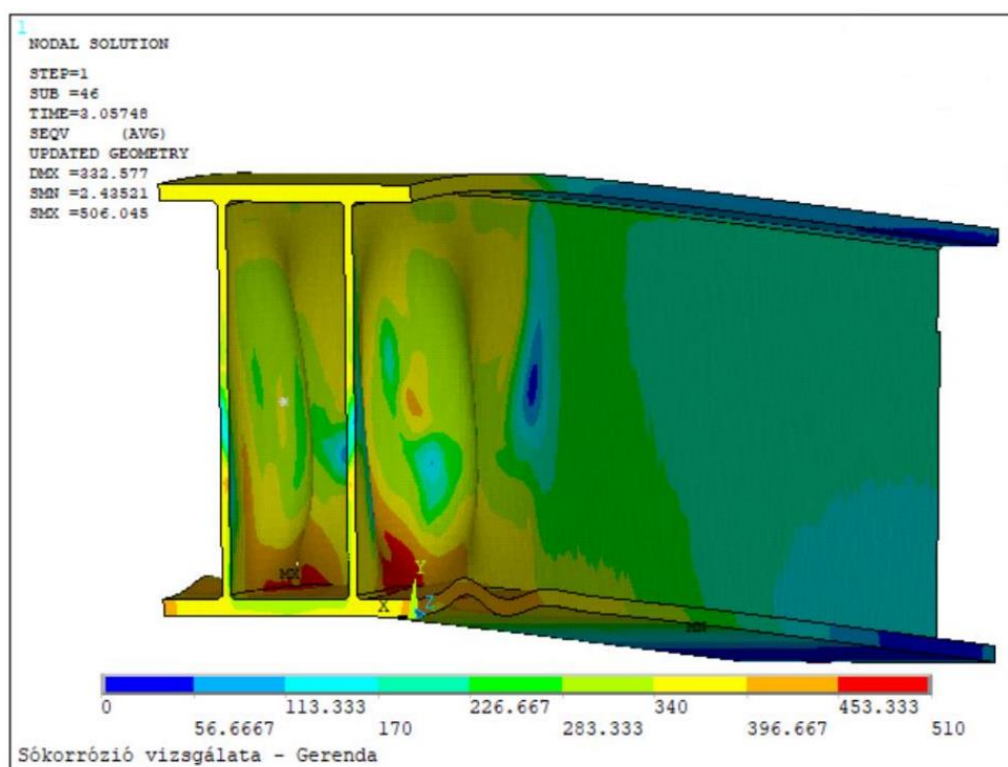
A $t=0$ (korróziómentes) időpontban, felső becslésű korróziós modellel előállított $t=50$ év és $t=100$ év, valamint a hagyományos, nem időjárásálló acél $t=50$ év elteltével előállított teher-elmozdulás diagramot mutatja az 6. ábra.



6. ábra: Teher elmozdulás diagram felső becslésű sókorróziós modellt alkalmazva.

A diagramon látható, hogy az időjárásálló acél felső becslésű korróziós modellel történt vizsgálata során a teher-elmozdulás diagramok már jobban eltérnek, mint az illesztett korróziós modellel végzett vizsgálatok esetén előállított diagramok, főleg 0 és 50 év között, de az 50 év alatti ~1,5%-os teherbírás csökkenés még mindig nem olyan jelentős, mint a nem időjárásálló acél esetén megfigyelt ~7,5%.

A $t=100$ év időpontban felső becslésű korróziós modellel vizsgált, időjárásálló acél szelvény tönkremenetelhez tartozó von Mises feszültségét mutatja a 7. ábra. Az ábrán a gerenda elmozdulása 1,5-szeres nagyítással szerepel. Az elmozdult alakon megfigyelhető a gödrös korrózió okozta egyenetlen felület. A szelvény a folyáshatárt a teher ~1,2-szeresénél éri el, ami ~8%-kal csökkent a kezdeti, $t=0$ évben vizsgált szelvénynél származtatott értékhez képest. A stabilitási tönkremenetel a teher ~3,06-szorosánál következik be, ami ~2,5%-os csökkenést jelent a $t=0$ évben vizsgált eredményhez képest.



7. ábra: Von Mises feszültség az utolsó konvergált lépésnél.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A végelelemes számítások eredményein látható, hogy az idő múlásával és a korrózió előrehaladtával csökken a szelvény a teherbírása. Megfigyelhető, hogy ez a csökkenés 0-50 között nagyobb, mint 50-100 év között, ami időjárásálló acél esetén az idővel kialakult patinaréteg védelmének, nem időjárásálló acél esetén pedig a szelvényen maradó rozsdadarabok „védő szerepének” köszönhető. A teherbírás csökkenés mértéke nagyban függ a korróziós modelltől: az időjárásálló acél esetén az illesztett korróziós modellel végzett mérések során alig csökkent a teherbírás, 100 év után is csak 0,7%-ot, felső becslésű modellel alkalmazva (ami a sózott út vezetőkorlátjának korrózióját jellemzi), is csak 2,5 % a teherbírás csökkenés. Nem időjárásálló acél esetén a teherbírás csökkenés értéke már 50 év után is jelentősebb, 8%.

A gerinc horpadása minden esetben a közbenső támasz közelében alakult ki, az alsó övtől kiindulva (ez a legjobban nyomott rész). Megfigyelhető, hogy hol az egyik gerinc horpadt előbb, hol a másik, aminek oka, hogy különböző helyen, és különböző mélységgel jöttek létre korróziós gödrök.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen cikk az egyik szerző (Megyeri Anna Boglárka) diplomamunkájának kivonata, így ezúton is köszönjük Dr. Kollár Dénes (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi egyetem, Hidak és Szerkezetek Tanszék, adjunktus) konzulensi támogatását és segítségét. A végelelemes futtatások a diplomamunka során az ANSYS Student program használatával készültek.

8. HIVATKOZÁSOK

[1]: Krivy, V., Kubzova M., Kreislova, K. & Konečný P. 2019. Corrosion Processes on Weathering Steel Bridges Influenced by Deposition of Deicing Salt. *Materials*. 2019; 12(7):1089. <https://doi.org/10.3390/ma12071089>

- [2]: Krivy V., Kubzova M., Kreislova K. & Hong H. P. T. 2019. Amount of Chlorides in Corrosion Products of Weathering Steel. *Transportation Research Procedia*, Volume 40, 2019, Pages 751-758, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.106>
- [3]: Zhang, Y., Zheng, K., Jin, Z., Ming, L. & Xioyang, F. 2021. Research on corrosion and fatigue performance of weathering steel and High-Performance steel for bridges. *Construction and Building Materials*, Volume 289, 2021, 123108, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123108>
- [4]: Hemmert-Halswick 1992. Weitergehende statistische Auswertung der Untersuchung zum Korrosionsverhalten von WT-Stählen unter Tausalzbeanspruchung. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- [5]: Virolainen, E. & Sayeenathan, M. 2022. The use of weathering steel in different environments.
- [6]: Guang-chong, Q., Shan-hua, X., Dao-qiang, Y. & Zong-xing Z. 2016. Study on the degradation of mechanical properties of corroded steel plates based on surface topography. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 125, 2016, Pages 205-217, ISSN 0143-974X, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.06.018>
- [7]: Qin, S. & Cui, W. 2003. Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements. *Marine Structures*, (15-34).
- [8]: Garbatov, Y. & Soares, C. G. 2011. Corrosion Modeling in Marine Structures. In book: *Marine Technology and Engineering* (pp.1121-1156), Publisher: Taylor & Francis Group Editors: Guedes Soares, C, Garbatov, Y, Fonseca, N. & Teixeira, A. P., <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2136.4722>
- [9]: Saad-Eldeen, S., Garbatov, Y. & Soares, C. G. 2011. Experimental assessment of the ultimate strength of a box girder subjected to severe corrosion. *Marine Structures*. Proc 11th Int. Symp. on Practical Design of Ships and other Floating, <https://doi.org/10.13140/2.1.2952.5446>
- [10]: „Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements”